

## Stochastische Generierung von Zuflusszeitreihen

### Produkt 3.2.1b

#### TP 3.2.1 – Wasserhaushalt im Einzugsgebiet von Talsperren

TP-Leiter: Dr. Franz Lennartz  
Dr. Niels Schütze  
Lehrstuhl für Hydrologie

Bearbeiter: Dipl. Hyd. Ruben Müller  
Lehrstuhl für Hydrologie

Kontakt: Dipl. Hyd. Ruben Müller  
Lehrstuhl für Hydrologie  
Institut für Hydrologie und Meteorologie  
Technische Universität Dresden  
Bergstraße 66  
01069 Dresden  
Tel.: 0351 / 46339578  
Fax: 0351 / 46337162  
E-Mail: ruben.mueller@tu-dresden.de

#### **REGKLAM**

#### **Entwicklung und Erprobung eines Integrierten Regionalen Klimaanpassungsprogramms für die Modellregion Dresden**

Gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung  
Förderkennzeichen: 01 LR 0802

Koordination: Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e. V. (IÖR)  
Weberplatz 1, 01217 Dresden  
Projektleiter: Prof. Dr. Dr. h.c. Bernhard Müller

**[www.regklam.de](http://www.regklam.de)**

## Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	2
<b>Abbildungen</b>	3
<b>Abbildungen im Anhang</b>	4
<b>Tabellen</b>	10
<b>Tabellen im Anhang</b>	10
1. Einleitung	11
2. Material und Methoden	13
2.1 DATENGRUNDLAGE	13
2.2 DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET	15
2.2.1 <i>Das Einzugsgebiet der Talsperren Klingenberg und Lehmühle</i>	15
2.2.2 <i>Das Einzugsgebiet der Talsperre Rauschenbach</i>	15
2.2.3 <i>Umsetzung des Talsperrensystems im Talsperrenbewirtschaftungsmodus OASIS</i>	16
2.3 GENERIERUNG QUASISTATIONÄRER HYDROLOGISCHER ZUSTÄNDE FÜR EINZELNE ZEITSCHNITTEN UND EMISSIONSSZENARIEN	17
2.4 MODELLIERUNG DER LOKALEN ZUFLÜSSE C UND D UNTER PROJIZIERTEN KLIMATISCHEN VERHÄLTNISSEN	18
2.1 STOCHASTISCHE SKALIERUNG ÜBER ZEITSKALEN (LANGZEITPERSISTENZ)	19
2.2 DAS HKNN-SMA ZEITREIHENMODELL	20
2.2.1 <i>Aufbau der künstlichen neuronalen Netze</i>	20
2.2.2 <i>Das Ablaufschema des hknn Zeitreihenmodells</i>	21
2.2.3 <i>Erweiterung des hknn Zeitreihenmodells mit dem Symmetric Moving Average (SMA) Filter</i>	21
2.2.4 <i>Auswertung der synthetisch generierten Zeitreihen</i>	23
3. Ergebnisse	25
3.1 ZEITREIHENGENERIERUNG FÜR REZENTE KLIMATISCHE BEDINGUNGEN UND IN DEN REANALYSEZEITRÄUMEN DER REGIONALEN KLIMAMODELLE	25
3.2 ZEITREIHENGENERIERUNG FÜR PROJIZIERTE KLIMATISCHE BEDINGUNGEN	37
3.3 ÜBERGREIFENDE UNTERSUCHUNGEN	38
4. Zusammenfassung und Diskussion	40
Literatur	45
Anhang	48

## Abbildungen

Abbildung 1:	Einzugsgebiet der Wilden Weißeritz bis zum Pegel Hainsberg 3 mit Teileinzugsgebieten, Talsperren und Lage der Pegel.....	15
Abbildung 2:	Einzugsgebiet der Talsperre Rauschenbach inklusive der Talsperre Flaje und Lage des Pegels Rauschenbach3. ....	16
Abbildung 3:	Schema des Talsperrensystems (nach MÜLLER 2014) .....	17
Abbildung 5:	Trendbereinigung .....	18
Abbildung 6:	Ergebnisse der nichtlinearen Regressionen auf Basis von KNN für die lokalen Zuflüsse C und D. ....	19
Abbildung 4:	Nilometer-Index .....	19
Abbildung 7:	Schema eines künstlichen neuronalen Netzwerks .....	20
Abbildung 8:	Korrektur negativer Zuflüsse.....	22
Abbildung 9:	Schema eines Boxplots .....	24
Abbildung 10:	Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwertefür den lokalen Zufluss A (Datengrundlage 1921-2007).....	25
Abbildung 11:	Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte für den lokalen Zufluss C (Datengrundlage 1921-2007).....	26
Abbildung 12:	Autokorrelationsfunktionen für den rezenten klimatischen Zustand auf jährlicher Skala und monatlicher Skala für den lokalen Zufluss A (Datengrundlage 1921-2007) .....	26
Abbildung 13:	Vergleich monatlicher und jährlicher Kreuzkorrelationen zwischen ausgewählten lokalen Zuflüssen (Datengrundlage 1921-2007).. ....	27
Abbildung 14:	Marginale Dichtefunktionen $f_K$ der Zuflüsse der Monate Januar (a), April (b), Juni (c) und Oktober (d) für den lokalen Zufluss A. ....	28
Abbildung 15:	Empirische kumulative Verteilungsfunktionen $F_X$ unterschiedlicher Parameter für Trockenperioden und Überschussperioden. (Datengrundlage 1921-2007). ....	29
Abbildung 16:	Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte für den lokalen Zufluss A für den Reanalysezeitraum 1961-1990, WETTREG2010. ....	30
Abbildung 17:	Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte für den lokalen Zufluss C für den Reanalysezeitraum 1961-1990, , WETTREG2010. ....	31
Abbildung 18:	Vergleich ausgesuchter monatlicher und jährlicher Kreuzkorrelationen zwischen lokalen Zuflüssen des Zeitraums 1961-1990 für das regionale Klimamodell WETTREG2010. ....	31
Abbildung 19:	Marginale Dichtefunktionen $f_K$ der Zuflüsse des Reanalysezeitraums 1961-1990, WETTREG2010 .....	32
Abbildung 20:	Autokorrelogramm auf jährlicher Zeitskala und monatlicher Zeitskala für den Zeitraum 1961-199, WETTREG2010.....	33
Abbildung 21:	Empirische kumulative Verteilungsfunktionen $F_X$ unterschiedlicher Parameter für Trockenperioden und Überschussperioden (Reanalysezeitraum 1961-1990, WETTREG2010).....	33
Abbildung 22:	Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte für den lokalen Zufluss A für den Reanalysezeitraum 1961-1990, CLM.. ....	34
Abbildung 23:	Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte für den lokalen Zufluss C für den Reanalysezeitraum 1961-1990, CLM. ....	34

Abbildung 24:	Vergleich ausgesuchter monatlicher und jährlicher Kreuzkorrelationen zwischen lokalen Zuflüssen des Zeitraums 1961-1990 für das regionale Klimamodell CLM...	35
Abbildung 25:	Autokorrelogramm auf jährlicher Zeitskala und monatlicher Zeitskala für den Zeitraum 1961-199, CLM.....	35
Abbildung 26:	Marginale Dichtefunktionen $f_K$ der Zuflüsse der Monate Januar (a), April (b), Juni (c) und Oktober (d) für den lokalen Zufluss A (Reanalysezeitraum 1961-1990, CLM).....	36
Abbildung 27:	Empirische kumulative Verteilungsfunktionen $F_x$ unterschiedlicher Parameter für Trockenperioden und Überschussperioden (Reanalysezeitraum 1961-1990, CLM). 37	
Abbildung 28:	Exponentielle Zunahme des Defizitvolumens für die Zeitscheibe 2021-2050, WETTREG2010, Emissionsszenario A1B. ....	38
Abbildung 29:	Zusammenhang zwischen $VFSA$ der beobachteten Zeitreihen und der mit den Zeitreihenmodellen $hknn$ und $hknn-sma$ generierten Zeitreihen.....	39
Abbildung 30:	Übersicht der ermittelten $VFSA$ in den Realisierungen (10, bzw. 2) der regionalen Klimamodelle WETTREG2010 (a,) und CLM (c) im Reanalysezeitraum 1961-1990, sowie der stochastisch generierten Zeitreihen des selben Zeitraums (WETTREG2010 (b) und CLM (d)). ....	39

## Abbildungen im Anhang

Abbildung A1:	Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte für den lokalen Zufluss A für die Beobachtungsdaten 1961-1990. ....	50
Abbildung A2:	Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte für den lokalen Zufluss C für die Beobachtungsdaten 1961-1990. ....	50
Abbildung A3:	Autokorrelationsfunktionen für den rezenten klimatischen Zustand auf jährlicher Skala und monatlicher Skala für den lokalen Zufluss A (Datengrundlage 1961-1990). ....	51
Abbildung A4:	Marginale Dichtefunktionen $f_K$ , Beobachtungsdaten 1961-1990 .....	51
Abbildung A5:	Empirische kumulative Verteilungsfunktionen $F_x$ unterschiedlicher Parameter für Trockenperioden und Überschussperioden. Der betrachtete Zeitraum ist 1961-1990. ....	52
Abbildung A6:	Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte für den lokalen Zufluss A für den Zeitraum 1991-2020, WETTREG2010, A1B. ....	53
Abbildung A7:	Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte für den lokalen Zufluss C für den Zeitraum 1991-2020, WETTREG2010, A1B. ....	53
Abbildung A8:	Vergleich ausgesuchter monatlicher und jährlicher Kreuzkorrelationen zwischen lokalen Zuflüssen des Zeitraums 1991-2020 für das regionale Klimamodell WETTREG2010, A1B. ....	54
Abbildung A 9:	Autokorrelogramm auf jährlicher Zeitskala und monatlicher Zeitskala für den Zeitraum 1991-2020, WETTREG2010. ....	54
Abbildung A10:	Marginale Dichtefunktionen $f_K$ der Zuflüsse des Zeitraums 1991-2020, WETTREG2010, A1B .....	55
Abbildung A11:	Empirische kumulative Verteilungsfunktionen $F_x$ unterschiedlicher Parameter für Trockenperioden und Überschussperioden (Reanalysezeitraum 1991-2020, WETTREG2010, A1B). ....	55
Abbildung A12:	Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte für den lokalen Zufluss A für den Zeitraum 2021-2050, WETTREG2010, A1B. ....	56



Abbildung A13: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte für den lokalen Zufluss C für den Zeitraum 2021-2050, WETTREG2010, A1B. ....	56
Abbildung A14: Vergleich ausgesuchter monatlicher und jährlicher Kreuzkorrelationen zwischen lokalen Zuflüssen des Zeitraums 2021-2050, A1B für das regionale Klimamodell WETTREG2010. ....	57
Abbildung A 15: Autokorrelogramm auf jährlicher Zeitskala und monatlicher Zeitskala für den Zeitraum 2021-2050, WETTREG2010, A1B. ....	57
Abbildung A16: Marginale Dichtefunktionen $f_K$ der Zuflüsse des Zeitraums 2021-2050, WETTREG2010, A1B .....	58
Abbildung A17: Empirische kumulative Verteilungsfunktionen $F_x$ unterschiedlicher Parameter für Trockenperioden und Überschussperioden (Reanalysezeitraum 2021-2050, WETTREG2010, A1B). ....	58
Abbildung A18: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte für den lokalen Zufluss A für den Zeitraum 2071-2100, WETTREG2010, A1B. ....	59
Abbildung A19: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte für den lokalen Zufluss C für den Zeitraum 2071-2100, WETTREG2010, A1B .....	59
Abbildung A20: Vergleich ausgesuchter monatlicher und jährlicher Kreuzkorrelationen zwischen lokalen Zuflüssen des Zeitraums 2071-2100, A1B für das regionale Klimamodell WETTREG2010.....	60
Abbildung A 21: Autokorrelogramm auf jährlicher Zeitskala und monatlicher Zeitskala für den Zeitraum 2071-2100, WETTREG2010, A1B. ....	60
Abbildung A22: Marginale Dichtefunktionen $f_K$ der Zuflüsse des Zeitraums 2071-2100, WETTREG2010, A1B .....	61
Abbildung A23: Empirische kumulative Verteilungsfunktionen $F_x$ unterschiedlicher Parameter für Trockenperioden und Überschussperioden (Reanalysezeitraum 2071-2100, WETTREG2010, A1B). ....	61
Abbildung A24: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte für den lokalen Zufluss A für den Zeitraum 1991-2020, WETTREG2010, A2 .....	62
Abbildung A25: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte für den lokalen Zufluss C für den Zeitraum 1991-2020, A2, WETTREG2010 .....	62
Abbildung A26: Vergleich ausgesuchter monatlicher und jährlicher Kreuzkorrelationen zwischen lokalen Zuflüssen des Zeitraums 1991-2020, A2 für das regionale Klimamodell WETTREG2010.....	63
Abbildung A27: Autokorrelogramm auf jährlicher Zeitskala und monatlicher Zeitskala für den Zeitraum 1991-2020, WETTREG2010, A2. ....	63
Abbildung A28: Marginale Dichtefunktionen $f_K$ der Zuflüsse des Zeitraums 1991-2020, WETTREG2010, A2 .....	64
Abbildung A29: Empirische kumulative Verteilungsfunktionen $F_x$ unterschiedlicher Parameter für Trockenperioden und Überschussperioden (Reanalysezeitraum 1961-1990, WETTREG2010, A2).....	64
Abbildung A30: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte für den lokalen Zufluss A für den Zeitraum 2021-2050, WETTREG2010, A2. ....	65
Abbildung A31: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte für den lokalen Zufluss C für den Zeitraum 2021-2050, WETTREG2010, A2. ....	65
Abbildung A32: Vergleich ausgesuchter monatlicher und jährlicher Kreuzkorrelationen zwischen lokalen Zuflüssen des Zeitraums 2021-2050, A2 für das regionale Klimamodell WETTREG2010.....	66

Abbildung A33:	Autokorrelogramm auf jährlicher Zeitskala (links) und monatlicher Zeitskala (rechts) für den Zeitraum 2021-2050, WETTREG2010, A2.....	66
Abbildung A34:	Marginale Dichtefunktionen $JK$ der Zuflüsse des Zeitraums 2021-2050, WETTREG2010, A2 .....	67
Abbildung A35:	Empirische kumulative Verteilungsfunktionen $F_x$ unterschiedlicher Parameter für Trockenperioden und Überschussperioden (Reanalysezeitraum 2021-2050, WETTREG2010, A2).....	67
Abbildung A36:	Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte für den lokalen Zufluss A für den Zeitraum 2071-2100, WETTREG2010, A2. ....	68
Abbildung A37:	Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte für den lokalen Zufluss C für den Zeitraum 2071-2100, WETTREG2010, A2. ....	68
Abbildung A38:	Vergleich ausgesuchter monatlicher und jährlicher Kreuzkorrelationen zwischen lokalen Zuflüssen des Zeitraums 2071-2100, A2 für das regionale Klimamodell WETTREG2010.....	69
Abbildung A39:	Autokorrelogramm auf jährlicher Zeitskala und monatlicher Zeitskala für den Zeitraum 2071-2100, WETTREG2010, A2. ....	69
Abbildung A40:	Marginale Dichtefunktionen $JK$ der Zuflüsse des Zeitraums 2071-2100, WETTREG2010, A2 .....	70
Abbildung A41:	Empirische kumulative Verteilungsfunktionen $F_x$ unterschiedlicher Parameter für Trockenperioden und Überschussperioden (Reanalysezeitraum 2071-2100, WETTREG2010, A2).....	70
Abbildung A42:	Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte für den lokalen Zufluss A für den Zeitraum 1991-2020, WETTREG2010, B1 .....	71
Abbildung A43:	Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte für den lokalen Zufluss C für den Zeitraum 1991-2020, B1, WETTREG2010. ....	71
Abbildung A44:	Vergleich ausgesuchter monatlicher und jährlicher Kreuzkorrelationen zwischen lokalen Zuflüssen des Zeitraums 1991-2020, B1 für das regionale Klimamodell WETTREG2010.....	72
Abbildung A45:	Autokorrelogramm auf jährlicher Zeitskala (links) und monatlicher Zeitskala (rechts) für den Zeitraum 1991-2020, WETTREG2010, B1.....	72
Abbildung A46:	Marginale Dichtefunktionen $JK$ der Zuflüsse des Zeitraums 1991-2020, WETTREG2010, B1. ....	73
Abbildung A47:	Empirische kumulative Verteilungsfunktionen $F_x$ unterschiedlicher Parameter für Trockenperioden und Überschussperioden (Reanalysezeitraum 1961-1990, WETTREG2010, B1).....	73
Abbildung A48:	Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte für den lokalen Zufluss A für den Zeitraum 2021-2050, WETTREG2010, B1. ....	74
Abbildung A49:	Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte für den lokalen Zufluss C für den Zeitraum 2021-2050, WETTREG2010, B1 .....	74
Abbildung A50:	Vergleich ausgesuchter monatlicher und jährlicher Kreuzkorrelationen zwischen lokalen Zuflüssen des Zeitraums 2021-2050, B1 für das regionale Klimamodell WETTREG2010.....	75
Abbildung A51:	Autokorrelogramm auf jährlicher Zeitskala und monatlicher Zeitskala für den Zeitraum 2021-2050, WETTREG2010, B1.. ....	75
Abbildung A52:	Marginale Dichtefunktionen $JK$ der Zuflüsse des Zeitraums 2021-2050, WETTREG2010, B1. ....	76

Abbildung A53:	Empirische kumulative Verteilungsfunktionen $F_x$ unterschiedlicher Parameter für Trockenperioden und Überschussperioden (Reanalysezeitraum 2021-2050, WETTREG2010, B1).....	76
Abbildung A54:	Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte für den lokalen Zufluss A für den Zeitraum 2071-2100, WETTREG2010, B1. ....	77
Abbildung A55:	Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte für den lokalen Zufluss C für den Zeitraum 2071-2100, WETTREG2010, B1. ....	77
Abbildung A56:	Vergleich ausgesuchter monatlicher und jährlicher Kreuzkorrelationen zwischen lokalen Zuflüssen des Zeitraums 2071-2100, B1 für das regionale Klimamodell WETTREG2010.....	78
Abbildung A57:	Autokorrelogramm auf jährlicher Zeitskala (links) und monatlicher Zeitskala (rechts) für den Zeitraum 2071-2100, WETTREG2010, B1.....	78
Abbildung A58:	Marginale Dichtefunktionen $J_K$ der Zuflüsse des Zeitraums 2071-2100, WETTREG2010, B1 .....	79
Abbildung A59:	Empirische kumulative Verteilungsfunktionen $F_x$ unterschiedlicher Parameter für Trockenperioden und Überschussperioden (Reanalysezeitraum 2071-2100, WETTREG2010, B1).....	79
Abbildung A60:	Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte für den lokalen Zufluss A für den Zeitraum 2071-2100, WETTREG2010, A2. ....	80
Abbildung A61:	Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte für den lokalen Zufluss C für den Zeitraum 2071-2100, WETTREG2010, A2. ....	80
Abbildung A62:	Vergleich ausgesuchter monatlicher und jährlicher Kreuzkorrelationen zwischen lokalen Zuflüssen des Zeitraums 1961-1990, A1B für das regionale Klimamodell CLM.....	81
Abbildung A63:	Autokorrelogramm auf jährlicher Zeitskala und monatlicher Zeitskala für den Zeitraum 1991-2020, CLM, A1B. ....	81
Abbildung A64:	Marginale Dichtefunktionen $J_K$ der Zuflüsse des Zeitraums 1991-2020, CLM, A1B.. ..	82
Abbildung A65:	Empirische kumulative Verteilungsfunktionen $F_x$ unterschiedlicher Parameter für Trockenperioden und Überschussperioden (Reanalysezeitraum 1961-1990, CLM, A1B).....	82
Abbildung A66:	Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte für den lokalen Zufluss A für den Zeitraum 2071-2100, WETTREG2010.....	83
Abbildung A67:	Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte für den lokalen Zufluss C für den Zeitraum 2071-2100, WETTREG2010, A2 .....	83
Abbildung A68:	Vergleich ausgesuchter monatlicher und jährlicher Kreuzkorrelationen zwischen lokalen Zuflüssen des Zeitraums 2021-2050, A1B für das regionale Klimamodell CLM.....	84
Abbildung A69:	Autokorrelogramm auf jährlicher Zeitskala und monatlicher Zeitskala für den Zeitraum 2021_2050, CLM, A1B.....	84
Abbildung A70:	Marginale Dichtefunktionen $J_K$ der Zuflüsse des Zeitraums 2021-2050, CLM, A1B. ....	85
Abbildung A71:	Empirische kumulative Verteilungsfunktionen $F_x$ unterschiedlicher Parameter für Trockenperioden und Überschussperioden (Reanalysezeitraum 2021-2050, CLM, A1B).....	85
Abbildung A72:	Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte für den lokalen Zufluss A für den Zeitraum 2071-2100, WETTREG2010, A2. ....	86

Abbildung A73: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte für den lokalen Zufluss C für den Zeitraum 2071-2100, WETTREG2010, A2 .....	86
Abbildung A74: Vergleich ausgesuchter monatlicher und jährlicher Kreuzkorrelationen zwischen lokalen Zuflüssen des Zeitraums 2071-2100, B1 für das regionale Klimamodell CLM.....	87
Abbildung A 75: Autokorrelogramm auf jährlicher Zeitskala (links) und monatlicher Zeitskala (rechts) für den Zeitraum 2071-2100, CLM, A1B .....	87
Abbildung A76: Marginale Dichtefunktionen $f_K$ der Zuflüsse des Zeitraums 2071-2100, CLM, A1B .....	88
Abbildung A77: Empirische kumulative Verteilungsfunktionen $F_x$ unterschiedlicher Parameter für Trockenperioden und Überschussperioden (Reanalysezeitraum 2071-2100, CLM, A1B).....	88
Abbildung A78: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte für den lokalen Zufluss A für den Zeitraum 2071-2100, WETTREG2010, A2. ....	89
Abbildung A79: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte für den lokalen Zufluss C für den Zeitraum 2071-2100, WETTREG2010, A2 .....	89
Abbildung A80: Vergleich ausgesuchter monatlicher und jährlicher Kreuzkorrelationen zwischen lokalen Zuflüssen des Zeitraums 1961-1990, B1 für das regionale Klimamodell CLM.....	90
Abbildung A81: Autokorrelogramm auf jährlicher Zeitskala und monatlicher Zeitskala für den Zeitraum 1991-2020, CLM, B1. ....	90
Abbildung A82: Marginale Dichtefunktionen $f_K$ der Zuflüsse des Zeitraums 1991-2020, CLM, B1.. ..	91
Abbildung A83: Empirische kumulative Verteilungsfunktionen $F_x$ unterschiedlicher Parameter für Trockenperioden und Überschussperioden (Reanalysezeitraum 1961-1990, CLM, B1).....	91
Abbildung A84: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte für den lokalen Zufluss A für den Zeitraum 2071-2100, WETTREG2010, A2. ....	92
Abbildung A85: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte für den lokalen Zufluss C für den Zeitraum 2071-2100, WETTREG2010, A2. ....	92
Abbildung A86: Vergleich ausgesuchter monatlicher und jährlicher Kreuzkorrelationen zwischen lokalen Zuflüssen des Zeitraums 2021-2050, B1 für das regionale Klimamodell CLM.....	93
Abbildung A87: Autokorrelogramm auf jährlicher Zeitskala (links) und monatlicher Zeitskala (rechts) für den Zeitraum 2021-2050, CLM, B1. ....	93
Abbildung A88: Marginale Dichtefunktionen $f_K$ der Zuflüsse des Zeitraums 2021-2050, CLM, B1.. ..	94
Abbildung A89: Empirische kumulative Verteilungsfunktionen $F_x$ unterschiedlicher Parameter für Trockenperioden und Überschussperioden (Reanalysezeitraum 2021-2050, CLM, B1).....	94
Abbildung A90: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte für den lokalen Zufluss A für den Zeitraum 2071-2100, CLM, A2. ....	95
Abbildung A91: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte für den lokalen Zufluss C für den Zeitraum 2071-2100, CLM, A2.. ....	95
Abbildung A92: Vergleich ausgesuchter monatlicher und jährlicher Kreuzkorrelationen zwischen lokalen Zuflüssen des Zeitraums 2071-2100, B1 für das regionale Klimamodell CLM.....	96

Abbildung A93: Autokorrelogramm auf jährlicher Zeitskala und monatlicher Zeitskala für den Zeitraum 2071-2100, CLM, A1B .....	96
Abbildung A94: Marginale Dichtefunktionen $f_K$ der Zuflüsse des Zeitraums 2071-2100, CLM, B1.. ..	97
Abbildung A95: Empirische kumulative Verteilungsfunktionen $F_X$ unterschiedlicher Parameter für Trockenperioden und Überschussperioden (Reanalysezeitraum 2071-2100, CLM, B1).....	97

## Tabellen

Tabelle 1:	Übersicht über die mittleren lokalen Zuflüsse unter dem regionalen Klimamodell WETTREG2010 für die Zeitscheiben 1991-2020, 2021-2050 und 2071-2100. Weiterhin werden die mittleren beobachteten Zuflüsse im Zeitabschnitt 1921-2010 und in der Zeitscheibe 1961-1990 dem Reanalysezeitraum von WETTREG2010, 1961-1990 gegenübergestellt. ....	13
Tabelle 2:	Übersicht über die mittleren lokalen Zuflüsse unter dem regionalen Klimamodell CLM für die Zeitscheiben 1991-2020, 2021-2050 und 2071-2100. Weiterhin werden die mittleren beobachteten Zuflüsse im Zeitabschnitt 1921-2010 und in der Zeitscheibe 1961-1990 dem Reanalysezeitraum von CLM, 1961-1990 gegenübergestellt. ....	14
Tabelle 3:	Anzahl der Realisierungen mit signifikanten Trends nach Emissionsszenario und lokalem Zufluss für das regionale Klimamodell WETTREG2010. ....	17
Tabelle 4:	Vergleich der geschätzten Hurst Koeffizienten $H$ für die beobachteten und simulierten Zuflusszeitreihen (hknn-sma) der lokalen Zuflüsse A, B, C und D. ....	27
Tabelle 5:	Übersicht über das maximale Defizitvolumen $VFSA$ ( $\text{hm}^3$ ), der Trockenperiodenlänge $LDEF$ (Monate), dem Trockenperiodendefizitvolumen $VDEF$ ( $\text{hm}^3$ ), der Überschussperiodenlänge $LSUR$ (Monate) sowie der Überschussperiodenvolumen $VSUR$ ( $\text{hm}^3$ ) für rezente klimatische Verhältnisse. ....	42
Tabelle 6:	Übersicht über das maximale Defizitvolumen $VFSA$ ( $\text{hm}^3$ ), der Trockenperiodenlänge $LDEF$ (Monate), dem Trockenperiodendefizitvolumen $VDEF$ ( $\text{hm}^3$ ), der Überschussperiodenlänge $LSUR$ (Monate) sowie der Überschussperiodenvolumen $VSUR$ ( $\text{hm}^3$ ) unter dem regionalen Klimamodell WETTREG2010. ....	43
Tabelle 7:	Übersicht über das maximale Defizitvolumen $VFSA$ ( $\text{hm}^3$ ), der Trockenperiodenlänge $LDEF$ (Monate), dem Trockenperiodendefizitvolumen $VDEF$ ( $\text{hm}^3$ ), der Überschussperiodenlänge $LSUR$ (Monate) sowie der Überschussperiodenvolumen $VSUR$ ( $\text{hm}^3$ ) unter dem regionalen Klimamodell CLM. ....	44

## Tabellen im Anhang

Tabelle A 1:	Signifikante Parameter der Regression zwischen dem lokalen Zufluss „B“ und dem Gesamtzufluss des Talsperrensystems Klingenberg und Lehmühle „GES“ für jeden Monat $m$ . ....	48
Tabelle A 2:	Signifikante Parameter der Regression zwischen dem lokalen Zufluss „D“ und dem Gesamtzufluss des Talsperrensystems Klingenberg und Lehmühle „GES“ sowie dem Gesamtzufluss der Talsperre Rauschenbach „C“ für jeden Monat $m$ . ....	49

# 1. Einleitung

Das Talsperrensystem Klingenberg - Lehmühle - Rauschenbach im sächsischen Osterzgebirge ist maßgeblich für die Trinkwasserversorgung des Weißeritzkreises, der Stadt Freital und, zu ca. 60%, der Stadt Dresden verantwortlich. Das Produkt 3.2.1c des REGKLAM Teilmoduls 3.2.1 stellt stochastisch generierte, langjährige Zuflusszeitreihen als Grundlage für die multikriterielle Optimierung der Talsperrensystembewirtschaftung unter veränderten klimatischen Randbedingungen (Teilmodul 3.2.1 - Produkt 3.2.1d) zur Verfügung.

In der Wasserwirtschaft wird die stochastische Generierung von Zeitreihen hauptsächlich in zwei Themengebieten eingesetzt. So können mittels geeigneter Zeitreihenmodelle Vorhersagen über Talsperrenzuflüsse, oder Abgabeanforderungen für wenige Zeitschritte auf der operationellen Zeitskala abgeschätzt werden um somit einen effizienten operationellen Betrieb zu gewährleisten. Die Generierung langjähriger synthetischer Zeitreihen findet in der Planungsphase von Versorgungsspeichern bei der Bemessung der benötigten Speichergröße Verwendung. Ebenso bilden langjährige synthetische Zeitreihen die Grundlage zur Evaluation der mittel- und langfristigen Talsperrenbewirtschaftung.

Seit FIERING im Jahr 1964 das als Fiering-Modell (FIERING 1964) bekannte Zeitreihenmodell einführt, ist die Zeitreihenmodellierung als Grundlage wasserwirtschaftlicher Berechnungen einer stetigen Weiterentwicklung unterworfen. Die angewandten stochastischen Zeitreihenmodelle entstammen dabei aus einer Vielzahl unterschiedlicher Modellklassen. SRINIVAS & SRINIVASAN (2006) geben eine weitreichende Übersicht über die Entwicklung der Zeitreihenmodellierung in der Wasserwirtschaft. Die klassischen Zeitreihenmodelle sind Parametrische Modelle. Sie entstammen der Gruppe der autoregressiven Modelle wie zum Beispiel  $AR(p)$  und  $ARMA(p,q)$ , sowie deren periodische Erweiterungen  $PAR(p)$ ,  $PARMA(p,q)$  (BOX & JENKINS 1976). Eine Vielzahl anderer parametrischer Zeitreihenmodelle ist in der Literatur bekannt (SALAS et al. 1980; VECCHIA 1985; RASMUSSEN et al. 1996; ANDERSON & MEERSCHAERT 2007). Disaggregierungsmodelle sind ebenfalls parametrische Modelle und arbeiten mit jeweils eigenen Teilmodellen auf unterschiedlichen Zeit- oder Raumskalen (VALENCIA & SCHAAKE 1973, SIVAKUMAR et al. 2004, LEE et al. 2010, SILVA & PORTELA 2012).

Nichtparametrische Zeitreihenmodelle sind erst seit neuerer Zeit im Fokus der Forschung. Verschiedene Arten des Bootstrapping, wie Moving-Block Bootstrapping, oder K-Nearest Neighbor Bootstrapping wurden erfolgreich zur Zeitreihenmodellierung eingesetzt (KIM et al. 2004, LALL & SHARMA 1996, NDIRITU 2011, PRAIRIE et al. 2006, SRINIVAS & SRINIVASAN 2006). Zeitreihenmodelle auf Basis künstlicher neuronaler Netze gehören in die Kategorie der Black-Box Modelle, ermöglichen jedoch besonders die Modellierung nichtlinearer Zusammenhänge (RAMAN & SUNIL-KUMAR 1995, SHARMA & O'NEIL 2002, OCHOA-RIVERA et al. 2002, PRAIRIE et al. 2006, AHMED & SARMA 2007, ASHRAFZADEH & RIZI 2009).

Zeitreihenmodelle, die abseits von Disaggregierungsmodellen, eine Langzeitpersistenz stochastischer Prozesse wiedergeben können, sind ebenfalls aktiver Gegenstand der Forschung (MONTANARI et al. 1999, KOUTSOYIANNIS 2001, ELEK & MÁRKUS 2004, LANGOUSIS & KOUTSOYIANNIS 2006). Die korrekte Abbildung der Autokorrelationsstruktur von stochastischen Prozessen auf jährlicher Zeitskala, und je nach Prozess auch von höheren Lags, ist bei der Generierung von Zeitreihen zur Bemessung von Versorgungsspeichern von großer Wichtigkeit (LANGOUSIS & KOUTSOYIANNIS 2006).

LEE et al. (2010) zitieren RAJAGOPALAN (2009), wonach parametrische, als auch nichtparametrische Modelle zumeist folgende Unzulänglichkeiten besitzen: (1) Erhalt der Korrelation über Modellgrenzen hinweg, wie z.B. die Korrelation des ersten Monats eines Jahres mit dem letzten Monat des vorherigen Jahres (2) die Generierung negativer Durchflüsse und (3) fehlende neuartige Innovationen, was dazu führt, dass keine unbeobachteten Durchflüsse simuliert werden können, oder sich Durchflussmuster zu oft wiederholen.

Das im Teilmodul entwickelte Zeitreihenmodell verbindet ein Modell auf Basis eines hybriden künstlichen neuronalen Netzes von ASHRAFZADEH & RIZI (2009) mit dem Symmetric Moving



Average- Filter (KOUTSOYIANNIS 2000, LANGOUSIS & KOUTSOYIANNIS 2006). Das Zeitreihenmodell wird dann zur multivariaten Zeitreihengenerierung von vier lokalen Zuflüssen zum Betrieb eines Talsperrenbewirtschaftungsmodells des Talsperrensystems Klingenberg - Lehnmühle - Rauschenbach angewandt.

Mit dem Ansatz von ASHRAFZADEH & RIZI (2009) können die von RAJAGOPALAN (2009) angeführten Punkte (1) und (3) erfüllt werden. Punkt (2) kann nur durch ein Postprocessing Verfahren korrigiert werden. Die Modellierung stochastischer Skalierung über Zeitskalen (Hurst-Phänomen) soll durch den Einsatz des Symmetric Moving Average- Filters ermöglicht werden. Klassische statistische Parameter sind gegenüber stochastischen Prozessen die dem Hurst-Phänomen unterliegen mit einem Bias behaftet. KOUTSOYIANNIS (2002) schlägt Erweiterungen der klassischen statistischen Parameter vor um diesen Bias zu beseitigen. In dieser Studie werden jedoch die klassischen statistischen Parameter angewandt.

Da im Produkt 3.2.1d die Talsperrenbewirtschaftung auf Basis von Stauraumlamellen optimiert wird, muss im Optimierungszeitraum ein quasistationärer Zustand herrschen. Dies bedeutet, dass kein deterministischer Trend, wie durch die Erhöhung der Emissionsgase in den Klimamodellen induziert, vorherrschen darf. Aus diesem Grunde werden die Zuflüsse der einzelnen Zeitscheiben trendbereinigt. Die jeweilig stochastisch generierten Zeitreihen spiegeln somit den mittleren, in der Zeitscheibe, vorherrschenden hydrologischen Zustand wider.

Der Bericht ist wie folgt gegliedert: Zunächst erfolgt die Erläuterung der Methodik und der Datengrundlagen. Im Ergebnisteil wird die Performance des Zeitreihenmodells beispielhaft an den Zeitreihenmodellierungen unter dem klimatischen und hydrologischen Regime der Jahre 1921-2007 und 1961-1990 mit einer Datengrundlage sowohl aus Beobachtungsdaten, als auch der Reanalyseläufe der regionalen Klimamodellen WETTREG2010 und CLM vorgestellt. Anschließend werden die Zeitreihenmodellierungen für die Zeitscheiben 1991-2020, 2021-2050 und 2071-2100 der projizierten Klimaveränderungen unter den IPCC Emissionsszenarien (IPCC 2007) A1B, A2 und B1 unter WETTREG2010 – und A1B und B1 unter CLM zusammengefasst dargestellt. Abbildungen zu den einzelnen statistischen Auswertungen der Zeitreihenmodellierungen befinden sich, aus Gründen des Umfangs und der Übersichtlichkeit, für die projizierten klimatischen Verhältnisse ausschließlich im Anhang.



## 2. Material und Methoden

### 2.1 Datengrundlage

#### Rezente Durchflussdaten

Als Datengrundlage zur Zeitreihenmodellierung unter rezenten klimatischen Verhältnissen wurde von der Landestalsperrenverwaltung Sachsen (LTV) ein Datensatz mit Talsperrengesamtzuflüssen bereitgestellt (Nov 1921 – Feb 2010). Dieser wurde aus der Talsperrenbewirtschaftung über den Massenbilanzansatz errechnet und beinhaltet sowohl die Gesamtzufluss des Talsperrensystems Klingenberg und Lehmühle (GES), als auch den Gesamtzufluss der Talsperre Rauschenbach (lokaler Zufluss C). Zusätzlich standen von der LTV bereitgestellte Bewirtschaftungsdaten mit Zuflüssen und Abgaben der Talsperren Klingenberg und Lehmühle für den Zeitraum von Januar 1991 bis Dezember 2004 zur Verfügung.

Tabelle 1: Übersicht über die mittleren lokalen Zuflüsse unter dem regionalen Klimamodell WETTREG2010 für die Zeitscheiben 1991-2020, 2021-2050 und 2071-2100. Weiterhin werden die mittleren beobachteten Zuflüsse im Zeitabschnitt 1921-2010 und in der Zeitscheibe 1961-1990 dem Reanalysezeitraum von WETTREG2010, 1961-1990 gegenübergestellt.

Zeitscheibe	Szenario	mittlerer lokaler Zufluss ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ )			
		WETTREG2010	A	B	C* D
1921-2010	Beobachtet		1.14	0.31	0.6 0.14
1961-1990	Beobachtet		1.16	0.32	0.60 0.15
1961-1990	Reanalyse		1.03	0.34	0.54 0.15
1991-2020	A1B		1.03	0.34	0.54 0.15
	B1		1.05	0.34	0.55 0.15
	A2		1.03	0.33	0.54 0.15
2021-2050	A1B		0.8	0.26	0.45 0.13
	B1		0.97	0.31	0.52 0.14
	A2		0.86	0.27	0.47 0.13
2071-2100	A1B		0.53	0.18	0.36 0.11
	B1		0.54	0.17	0.36 0.1
	A2		0.54	0.17	0.36 0.1

\* ohne Abgabe der Talsperre Flaje von  $0.075 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$

Aus diesem Datensatz kann für den Zeitraum von 1991 bis 2004 der Zwischengebietszufluss zwischen den Talsperren Lehmühle und Klingenberg abgeleitet werden. Auf dessen Basis wurde eine ANOVA-Analyse durchgeführt um ein lineares Regressionsmodell für jeden Monat  $m = 1, \dots, 12$ , Gleichung (1), zwischen dem lokalen Zufluss B (entspricht dem Zwischengebietsabfluss, siehe Abbildung 3) und dem Gesamtzufluss des Talsperrensystems Klingenberg und Lehmühle, GES, aufzustellen.

$$B_m = \alpha_m + \beta_m \times \text{GES}_m + \beta_{m-1} \times \text{GES}_{m-1} \quad (1)$$

Hierbei ist  $\alpha_m$  der Intercept für jeden Monat  $m$ ,  $\beta_m$  und  $\beta_{m-1}$  sind die Regressionskoeffizienten für den gleichen Monat  $m$  sowie den vorhergehenden Monat  $m - 1$ . Die ANOVA-Analyse ergab für keinen Monat einen signifikanten Intercept  $\alpha_m$  und lediglich für die Monate Juni,  $m = 6$ , und Juli,  $m = 7$ , signifikante  $\beta_{m-1}$ , siehe Tabelle A 1 im Anhang.

Weiterhin wurde mittels einer ANOVA-Analyse ein monatliches lineares Regressionsmodell, Gleichung (2), zwischen dem Pegel Rauschenbach 3 (lokaler Zufluss D, siehe Abbildung 3) und dem

Gesamtzufluss des Talsperrensystems Klingenberg und Lehmühle (GES) sowie dem Gesamtzufluss der Talsperre Rauschenbach (lokaler Zufluss C, siehe Abbildung 3) aufgestellt.

$$D_m = \alpha_m + \beta_{0,m} \times C_m + \beta_{1,m} \times GES_{m-1} \quad (2)$$

Daten für den Pegel Rauschenbach 3 standen für den Zeitraum Jan 1991 bis Dez 2003 zur Verfügung. Tabelle A2 im Anhang listet die geschätzten Regressionsparameter auf.

Die Regressionsmodelle werden genutzt um die Datengrundlage die lokalen Zuflüsse B und D für die Zeitreihenmodellierung in den Zeitscheiben 1961-1990 und 1921-2007 zu ermitteln.

#### *Durchflüsse unter veränderten klimatischen Verhältnissen*

Die lokalen Zuflüsse entstammen dem Produkt 3.2.1a „Wasserhaushalt für projizierte Klimaszenarien“. Die hierbei verwendeten meteorologischen Inputgrößen entstammen der Modellkaskade aus dem globalen Zirkulationsmodells ECHAM5/MPI-OM T63 Lauf 1 (ROECKNER et al. 2003, 2006), sowie dem statistischen regionalen Klimamodell WETTREG2010, oder dem dynamischen regionalen Klimamodell CLM 3 (CLM) und wurde vom REGKLAM-Teilprojekt 2.1 (Lehrstuhl für Meteorologie, TU Dresden) zur Verfügung gestellt (HEIDENREICH et al. 2011). Die lokalen Zuflüsse leiten sich aus dem jeweiligen Median der simulierten lokalen Zuflüsse aus der Parameterunsicherheitsanalyse unter Verwendung von jeweils 15 Pareto-optimalen Parametersätzen ab (MÜLLER et al. 2013).

Der an den Emissionsgasausstoß gekoppelte projizierte Klimawandel führt unter dem statistischen regionalen Klimamodell WETTREG2010 nach Tabelle 1 für das Talsperrensystem zu einer Abnahme der Zuflüsse um ca. 25 % bis zum Jahr 2050. Bis zum Jahr 2100 wird eine Abnahme von ca. 50 % projiziert. Hierbei führt das Emissionsszenario A1B jeweils zu den deutlichsten Abnahmen im Zufluss.

Unter dem dynamischen regionalen Klimamodell CLM kommt es hingegen zu keiner eindeutigen Abnahme des Talsperrenzuflusses über den gesamten Projektionszeitraum, siehe Tabelle 2. Im Vergleich der Beobachtungsdaten mit den projizierten Zuflüssen aus WETTREG2010 zeigen sich deutliche Unterschiede in den Zuflussdaten. Im Schnitt ist der mittlere Zufluss von B um  $0,1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  größer als in der Beobachtung. Gleichzeitig ist der mittlere Zufluss von A um  $0,1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  geringer. Dieser Unterschied könnte auf die abweichende räumliche Verteilung des Niederschlags im regionalen Klimamodell mit der großen räumlichen Auflösung von  $0,165^\circ$  zurückzuführen sein.

Tabelle 2: Übersicht der mittleren lokalen Zuflüsse unter dem regionalen Klimamodell CLM für die Zeitscheiben 1991-2020, 2021-2050 und 2071-2100. Weiterhin werden die mittleren beobachteten Zuflüsse im Zeitabschnitt 1921-2010 und in der Zeitscheibe 1961-1990 dem Reanalysezeitraum von CLM, 1961-1990 gegenübergestellt.

Zeitscheibe	Szenario	mittlerer lokaler Zufluss ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ )			
		A	B	C*	D
1921-2010	Beobachtet	1.14	0.31	0.6	0.14
1961-1990	Beobachtet	1.16	0.32	0.60	0.15
1961-1990	Reanalyse	0.96	0.43	0.59	0.16
2021-2050	A1B	0.94	0.42	0.58	0.16
	B1	0.91	0.40	0.57	0.16
2051-2070	A1B	0.97	0.43	0.59	0.16
	B1	0.95	0.43	0.59	0.16
2071-2100	A1B	0.91	0.41	0.58	0.16
	B1	0.96	0.43	0.59	0.16

\* ohne Abgabe der Talsperre Flaje von  $0.075 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$

## 2.2 Das Untersuchungsgebiet

### 2.2.1 Das Einzugsgebiet der Talsperren Klingenberg und Lehmühle

Das Einzugsgebiet der Wilden Weißeritz, die von den Talsperren Klingenberg und Lehmühle angestaut wird, erstreckt sich südwestlich der Stadt Dresden. Die Einzugsgebietsgröße der Talsperren Klingenberg, das das Einzugsgebiet der Talsperre Lehmühle beinhaltet, ist bis zum Auslasspegel der Talsperre Klingenberg ca. 90 km<sup>2</sup> groß und erstreckt sich über ca. 540 Höhenmeter.

Abbildung 1 Das Untersuchungsgebiet befindet sich nach der genetischen Klimaklassifikation von NEEF im Übergangsklima der gemäßigten Klimazone. Die Hälfte des Einzugsgebietes ist mit Nutzwäldern bedeckt, die restliche Landnutzung beschränkt sich fast ausschließlich auf Acker-, Grünland-, und Waldflächen (MÜLLER et al. 2013), siehe Abbildung 1.

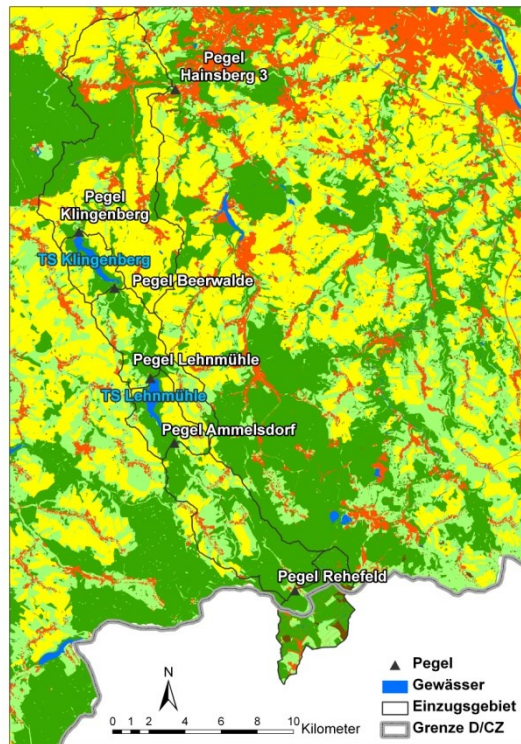


Abbildung 1: Einzugsgebiet der Wilden Weißeritz bis zum Pegel Hainsberg 3 mit Teileinzugsgebieten, Talsperren und Lage der Pegel (MÜLLER et al. 2013).

### 2.2.2 Das Einzugsgebiet der Talsperre Rauschenbach

Der Großteil des Einzugsgebietes der grenzüberschreitenden Talsperre Rauschenbach im Osterzgebirge liegt auf tschechischem Staatsgebiet. Oberstromig des Hauptzuflusses Flöha liegt die Talsperre Flaje, siehe Abbildung 2. Für die Flaje liegen keinerlei Bewirtschaftungsdaten vor, nur dass diese eine Mindestabgabe von 0,075 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> nahe der Staatsgrenze realisiert. Weitere Zuflüsse zur Talsperre Rauschenbach sind der Rauschenbach und der Wernersbach. Die im Einzugsgebiet mit 85 % Flächenbedeckung vorherrschende Landnutzung ist Wald und Wald mit Strauch Übergangsstadien. Grünland und Acker machen nur 8 %, bzw. 3 % der Landnutzung aus. Das Einzugsgebiet erstreckt sich dabei von 558 m ü. NN bis auf 943 m ü. NN in den Kammlagen des Osterzgebirges. Damit ergibt sich ein Höhenunterschied von 385 Metern.

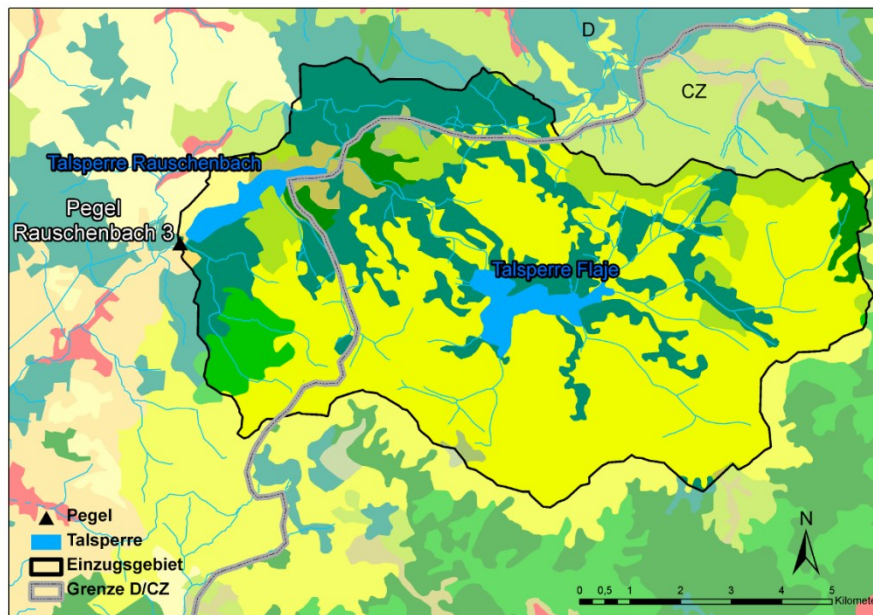


Abbildung 2: Einzugsgebiet der Talsperre Rauschenbach inklusive der Talsperre Flaje und Lage des Pegels Rauschenbach3.

### 2.2.3 Umsetzung des Talsperrensystems im Talsperrenbewirtschaftungsmodell OASIS

Für das in OASIS (HYDROLOGICS INC. 2009) implementierte Talsperrensystem, Abbildung 3, werden für die Talsperren Lehmühle, Klingenberg und Rauschenbach lokale Zuflüsse in der Form von Gesamtzuflüssen in die jeweilige Talsperre benötigt.

Für die Talsperren Lehmühle und Klingenberg leiten sich diese unter projizierten Klimaentwicklungen aus den Durchflüssen am Gebietsauslass der Modellgebiete A und aus der Summe der Modellgebiete B und C (MÜLLER et al. 2013) ab. Für den rezenten Zeitraum werden die von der LTV zur Verfügung gestellten Daten der Gesamtzuflüsse (1921-2010) verwendet. Diese Daten werden aus dem Betrieb der Talsperren anhand des Masseerhaltungssatzes errechnet. Für die Talsperre Rauschenbach stehen für den rezenten Zeitraum ebenfalls von der LTV bereitgestellte Daten der Gesamtzuflüsse zur Verfügung (1921-2007).

Wegen der schlechten Datenlage über das Einzugsgebiet der Talsperre Rauschenbach (ein Großteil des Einzugsgebietes liegt auf tschechischem Staatsgebiet) konnte hier kein Wasserhaushaltsmodell aufgestellt werden. Auch fehlen Bewirtschaftungsdaten der Talsperre Flaje. Für die Zeitreihenmodellierungen unter projizierten Klimaszenarien werden die zur Wasserhaushaltsmodellierung zugehörigen Gesamtzuflüsse der Talsperre Rauschenbach (C) und der lokalen Zuflüsse des Pegels Rauschenbach3 (D) über ein künstliches neuronales Netz geschätzt (Abschnitt 2.4). Für die rezenten Zeiträume steht der Talsperrengesamtzufluss der Talsperre Rauschenbach zur Verfügung. Daten des Pegels Rauschenbach3 entstammen einer linearen Regression (Abschnitt 2.1).

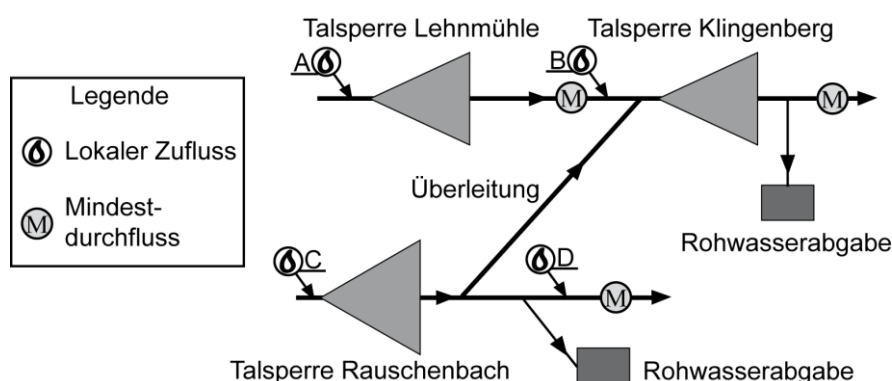


Abbildung 3: Schema des Talsperrensystems (nach MÜLLER & SCHÜTZE 2013)

### 2.3 Generierung quasistationärer hydrologischer Zustände für einzelne Zeitscheiben und Emissionsszenarien

Das Ziel der Mehrzieloptimierung in Produkt 3.2.1d ist die Optimierung des Talsperrensystems der Talsperren Klingenberg, Lehmühle und Rauschenbach. Optimierungsgegenstand sind dabei Stauraumlamellen die die Bewirtschaftung der Trinkwasserabgaben und der Überleitung von Wasser aus der Talsperre Rauschenbach vorgeben. Lamelleneinteilungen gelten für quasistationäre Zuflüsse. Unter diesem Hintergrund ist es nicht wünschenswert, dass die Zuflusszeitreihen der lokalen Zuflüsse deterministische Trends aufweisen. Dies ist jedoch innerhalb der Zeitscheiben der projizierten Klimaänderungsszenarien teilweise der Fall. Für das regionale Klimamodell WETTREG2010 sinken die Zuflüsse bedingt durch den projizierten abnehmenden Niederschlag (MÜLLER et al. 2013). Für das regionale Klimamodell CLM sind hingegen keine negativen Trends in den Zuflüssen zu erkennen, hier ist auch der Niederschlag nicht trendbehaftet.

#### Lineare deterministische Trends in den Zuflusszeitreihen

In einem ersten Schritt werden daher die einzelnen Realisationen der regionalen Klimamodelle in den Zeitscheiben trendbereinigt. Für das regionale Klimamodell WETTREG2010 stehen dabei für jedes Emissionsszenario 10 Realisierungen zur Verfügung, bei CLM sind dies je zwei Realisierungen. Tabelle 3 gibt die Anzahl der Realisationen innerhalb einer Zeitscheibe unter dem regionalen Klimamodell WETTREG2010 an, die signifikante ( $\alpha = 0.05$ ) lineare Trends aufweisen. Für das regionale Klimamodell CLM können in keiner Zeitscheibe Realisationen mit signifikanten Trends gefunden werden.

Tabelle 3: Anzahl der Realisationen mit signifikanten Trends nach Emissionsszenario und lokalem Zufluss für das regionale Klimamodell WETTREG2010.

Emissionsszenario	A1B		A2		B1	
	A	B	A	B	A	B
lokaler Zufluss \ Zeitscheibe						
1991-2020	0	0	0	0	0	0
2021-2050	0	0	0	9	0	3
2071-2100	1	4	0	10	0	8

#### Trendbereinigung

Um die innerjährlichen Phasen mit niedrigen Zuflüssen im Sommer und Herbst durch eine lineare Trendbereinigung nicht zu beeinträchtigen, werden die Zeitreihen vor der Trendbereinigung logarithmiert. Ein Trend wird dann für die log-transformierte Zeitreihe ermittelt und bereinigt. Wie Abbildung 4 beispielhaft gezeigt werden so vor allem die Phasen mit hohen Zuflüssen in den Winter – Frühlingsmonaten beeinflusst, während die Phasen niedrigen Zuflusses nur sehr wenig beeinflusst werden. Die korrekte Abbildung der Trockenphasen ist für die anschließende Optimierung der Talsperrenbewirtschaftung von Bedeutung.



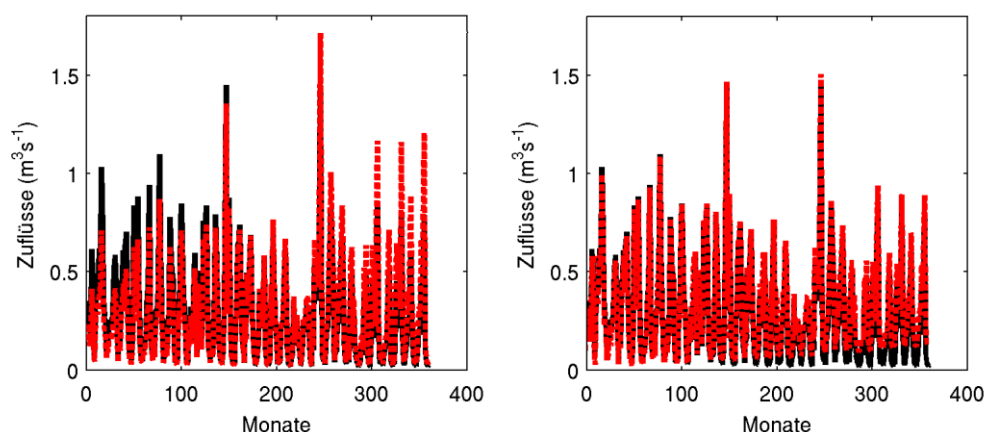


Abbildung 4: Trendbereinigung anhand der nicht transformierten Zeitreihe (rechts, rot) und der zuvor logarithmierten Zeitreihe (links, rot) im Vergleich zur original Zeitreihe unter WETTREG2010, Emissionsszenario A2 in der Periode 2021-2050 (jeweils in schwarz, Realisierung 0).

#### Erstellen der Trainingsdatensätze für die künstlichen neuronalen Netze

Zum anlernen eines künstlichen neuronalen Netzes sollte der Trainingsdatensatz möglichst groß sein um alle möglichen Systemzustände abdecken. Erst dann kann eine hohe Interpolationsfähigkeit gewährleistet werden. Die zehn, bzw. zwei Realisierungen der regionalen Klimamodelle WETTREG2010 und CLM sind unterschiedliche zufällige Ausprägungen desselben meteorologischen Prozesses mit dem jeweils selben, durch die Emissionsszenarien aufgeprägten, deterministischen klimatischen Trend. Da die Realisierungen somit derselben Grundgesamtheit entstammen, können diese, nach der Trendbereinigung, in einen Gesamtdatensatz über alle Realisationen einer Zeitscheibe und eines Emissionsszenarios unter demselben regionalen Klimamodell integriert werden. Dies geschieht durch einfaches Aneinanderreihen der zehn, bzw. zwei Realisierungen zu jeweils 300 jährigen, bzw. 60 jährigen, Gesamtdatensätzen. Hierbei werden die Realisationen sequentiell nach ihrer Realisationsnummer (00-99, 1-2) angeordnet. Durch die sequentielle Anordnung der Realisationen im Gesamtdatensatz ergibt sich, vor allem für höhere Lags, eine Unsicherheit bezüglich der Autokorrelationsstruktur. Zur Abschätzung der Unsicherheit werden 10.000 zufällige Anordnungen der einzelnen Realisationen gezogen und jeweils ein Autokorrelogramm auf jährlicher Zeitskala berechnet. Die Bandbreite durch die Unsicherheit der Anordnung der Realisationen wird in den entsprechenden Autokorrelogramm mit angegeben.

## 2.4 Modellierung der lokalen Zuflüsse C und D unter projizierten klimatischen Verhältnissen

Für das Einzugsgebiet der Talsperre Rauschenbach konnte kein Wasserhaushaltsmodell aufgebaut werden um lokale Zuflüsse unter projizierten klimatischen Rahmenbedingungen abzuleiten. In Anlehnung an Abschnitt 2.1 wird eine nichtlineare Regression auf Basis künstlicher neuronaler Netze auf monatlicher Basis durchgeführt. Die lokalen Zuflüsse C und D werden anhand des beobachteten Gesamttalsperrenzuflusses GES der Talsperren Klingenberg und Lehmühle berechnet. Die Zuflussdaten entstammen jeweils dem Zeitraum Nov 1921 – Okt 2007.

Die  $R^2$  Statistiken der KNN-Regressionen zwischen GES und C bzw. GES und D betragen 0,78 und 0,87. Abbildung 5 zeigt die Streudiagramme der beobachteten und per KNN-Regression geschätzten Zuflusswerte.

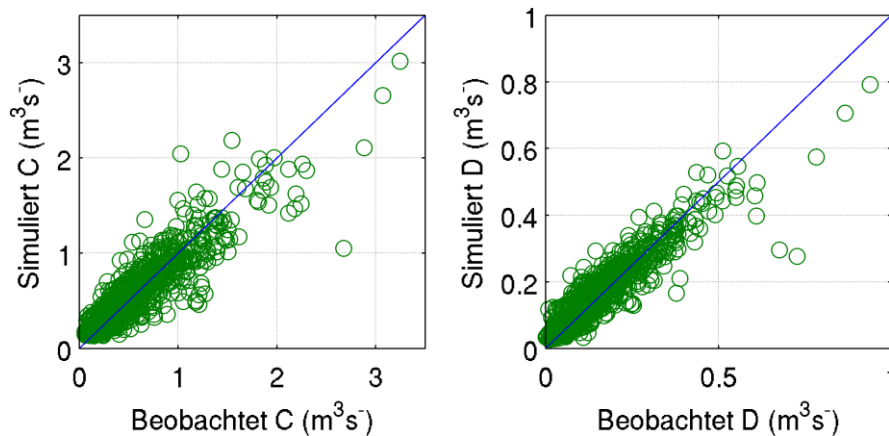


Abbildung 5: Ergebnisse der nichtlinearen Regressionen auf Basis von KNN für die lokalen Zuflüsse C und D. Die Regressionsgerade ist als blaue Linie dargestellt, grüne Kreise markieren das Streudiagramm zwischen den beobachteten und simulierten Zuflusswerten.

## 2.5 Stochastische Skalierung über Zeitskalen (Langzeitpersistenz)

Eine ausführliche Diskussion zur stochastischen Skalierung über Zeitskalen (SSZ), auch als Langzeitpersistenz bezeichnet, und unter dem Hurst Phänomen (HURST 1951) schon länger bekannt, gibt KOUTSOYIANNIS (KOUTSOYIANNIS 2006). SSZ Prozesse zeigen zufällige fluktuierende Mittelwerte ausgelöst durch unterschiedliche stochastische oder hydrologische Prozesse, auf mehreren Zeitskalen, siehe Abbildung 6. Diese Fluktuationen erzeugen ein zufälliges Muster fallender und steigender nichtdeterministischer Trends (KOUTSOYIANNIS 2000).

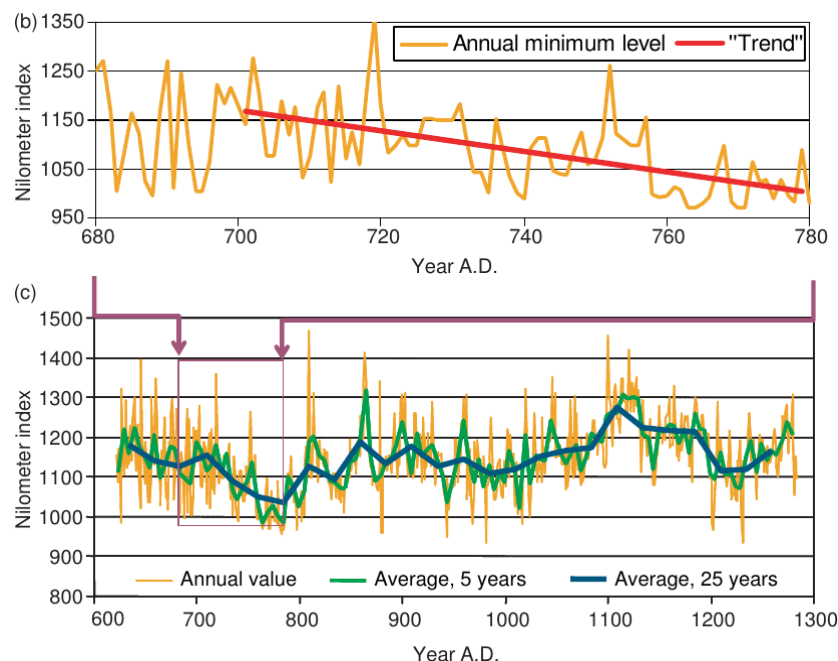


Abbildung 6: (b) Nilometer Index für ein Zeitfenster von 100 Jahren mit einem deterministischen Trend wie er unter stationären Bedingungen angenommen werden könnte. (c) In der längeren Durchflusszeitreihe zeigt sich der Trend als nicht haltbar und als Teil eines stochastischen Prozesses auf höherer Zeitskala (nach KOUTSOYIANNIS 2006).

Wie ausgeprägt eine Zeitreihe mit SSZ über langjährige Zeitskalen skaliert, kann durch den Hurst Koeffizienten  $H$  beschrieben werden. Im Allgemeinen besitzen Zeitreihen mit SSZ einen Hurst Koef-

fizienten größer als 0.5 (KOUTSOYIANNIS 2006). Wird das Autokorrelogramm eines starken SSZ Prozesses betrachtet, zeigt sich ein sehr langsames exponentielles abklingen der Autokorrelationskoeffizienten über viele Lags hinweg. So sind z.B. für das Autokorrelogramm des Nils noch signifikante Autokorrelationen nach über 30 Lags auf jährlicher Zeitskala vorhanden. Bei schwachen SSZ Prozessen, wie in dieser Studie anzutreffen, betrifft dies nur wenige Lags.

## 2.6 Das hknn-sma Zeitreihenmodell

Das verwendete Zeitreihenmodell basiert auf dem hybriden künstlichen neuronalen Netz nach ASHRAFZADEH & RIZI (2009). Das Modell verwendet für jeden Monat (Saison) ein künstliches neuronales Netz (KNN) um die grundlegenden periodischen stochastischen Zusammenhänge auf monatlicher Basis abzubilden. Innovationen werden durch eine nichtlineare lokale Regression auf Basis einer Kombination von KNN und nichtparametrisches K-Nearest Neighbor Bootstrap erzeugt. Nach ASHRAFZADEH & RIZI (2009) ist dies eine Abwandlung einer von PRAIRIE et al. (2006) eingeführten Methodik. PRAIRIE et al. verwenden eine lokal gewichtete Regressionsmethode um lokale Polynome zwischen den Merkmalsvektoren der vorherigen und des zu schätzenden Monats zu ermitteln und somit Innovationen abzuleiten. Um SSZ zu simulieren wird nach abgeschlossener Zeitreihengeneration ein Postprocessing der Zeitreihe mit dem Symmetric Moving Average-Filter (SMA-Filter; KOUTSOYIANNIS 2002, LANGOUSIS & KOUTSOYIANNIS 2006) durchgeführt. Demnach stehen zwei Modelle zur Verfügung: das hknn Modell bestehend aus dem hybriden KNN ohne den SMA-Filter und das hknn-sma Modell bestehend aus dem hybriden KNN und nachgeschaltetem SMA-Filter.

Im Folgenden werden der Aufbau und die Arbeitsweise des hknn-sma Modells, ohne Beschränkung einer möglichen Verallgemeinerung, anhand einer Anwendung für die lokalen Zuflüsse des Talsperrensystems Klingenberg-Lehnmühle-Rauschenbach beschrieben.

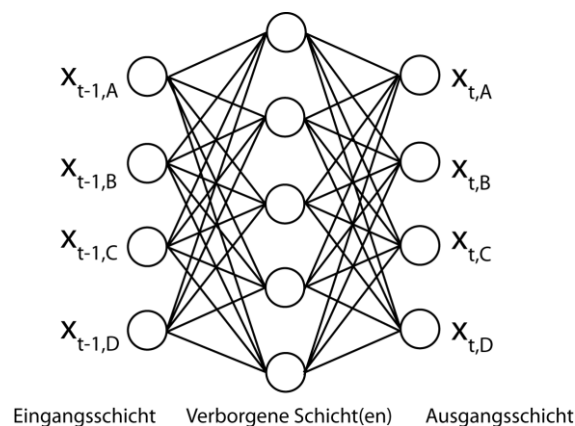


Abbildung 7: Schema eines künstlichen neuronalen Netzwerks mit Eingabeschicht und Ausgabeschicht zur Modellierung der vier lokalen Zuflüsse A bis D für den aktuellen Monat aus dem zurückliegenden Monat.

### 2.6.1 Aufbau der künstlichen neuronalen Netze

Um das hknn Modell zu parametrisieren wird im ersten Schritt für jeden Monat ( $s = 1, \dots, 12$ ) ein eigenständiges künstliches neuronales Netzwerk ( $KNN_s$ ) mit der Neuronen Toolbox von Mathworks MATLAB® aufgebaut. Als KNN findet ein Feed-Forward Multi-Layer Perceptron (MLP) Verwendung. Um eine Überanpassung des KNN zu verhindern wird der Bayesian Regulation Backpropagation Trainingsalgorithmus (MACKAY 1992) zum anlernen verwendet.

Die Eingangsschicht eines MLP für einen Monat des Jahres besteht aus vier Neuronen für die vier lokalen Zuflüsse A, B, C und D des jeweils vorherigen Monats (Merkmalsvektor  $M$ ), siehe Abbildung 7. Die Ausgangsschicht eines MLP für einen Monat des Jahres besteht aus vier Neuronen für die



vier lokalen Zuflüsse A, B, C und D des jeweils aktuellen Monats (Merkmalsvektor  $N$ ). Die Anzahl der verborgenen Schicht(en) als auch die Anzahl der verwendeten Neuronen in der verborgenen Schicht variiert in den zu modellierenden Zeitreihen. Erfordert es die Autokorrelationsstruktur einer Zeitreihe, kann die Eingangsschicht mit weiteren Neuronen zur Aufnahme von Input von Monaten mit höheren Lags erweitert werden.

### 2.6.2 Das Ablaufschema des hknn Zeitreihenmodells

Vor Beginn des Generierungsprozesses sind die  $KNN_s$  der einzelnen Monate anzulernen, wobei jeweils die lokalen Zuflüsse des Monats  $s$  aus dem zurückliegenden Monat  $s - 1$  geschätzt werden. Für jeden Zeitschritt  $t$  innerhalb der stochastischen Zeitreihenmodellierung gilt dann:

1. Der aktuelle Zeitschritt sei  $t$  mit dem zugehörigen aktuellen Monat  $s$ . Mittels des  $KNN_s$  wird der Merkmalsvektor  $N$  des Zeitschrittes  $t$  aus dem Merkmalsvektor  $M$  des vorherigen Monats  $s - 1$  bei  $t - 1$  der synthetischen Zeitreihe geschätzt.
2. Ein zu  $N$  ähnlicher Merkmalsvektor  $O$  wird dann mittels K-Nearest Neighbor Bootstrap aus den Beobachtungsdaten ermittelt. Das Ablaufschema zu diesem Schritt ist:
  - 2.1. Erstelle für den zum Zeitpunkt  $t - 1$  aktuellen Monat  $s - 1$  ein Set  $S$  aus allen  $n$  möglichen Merkmalsvektoren  $P$  der lokalen Zuflüsse der gleichen Monate  $s - 1$  aus der beobachteten Datengrundlage.
  - 2.2. Berechne für alle Merkmalsvektoren  $P$  aus den Set  $S$  die Euklidische Distanz  $r$  zwischen  $P$  und  $M$ . Sortiere alle  $P$  aus  $S$  nach der jeweiligen Euklidischen Distanz  $r$  um somit für jeden Merkmalsvektor  $P$  einen zugehörigen Rang  $j$  zu erhalten.
  - 2.3. Auf Basis der diskreten Wahrscheinlichkeitsfunktion  $c_j = (1/j)/(\sum_{j=1}^k 1/j)$ ,  $k = n^{0.5}$  kann die kumulative Wahrscheinlichkeitsfunktion  $p_j = \sum_{j=1}^k c_j$  ermittelt werden. Mit  $k$  gleichverteilten Zufallszahlen  $z \in (0,1)$ ,  $p_1 < z < p_k$ , wird ein Merkmalsvektor  $P$  aus  $S$  gezogen dessen zugehöriges  $p_j$  am nächsten an  $z$  liegt. Dieser wird als Merkmalsvektor  $O$  deklariert.
3. Mittels  $KNN_s$  für den aktuellen Monat  $s$  und des Merkmalsvektors  $O$  wird der auf  $O$  nachfolgende Merkmalsvektor  $\tilde{Q}$  geschätzt. Anschließend wird der Fehlerwert  $e$  als Differenz von  $N$  und  $\tilde{Q}$  ermittelt.
4. Der im ersten Schritt ermittelte Merkmalsvektor  $N$  wird mittels des Fehlerwerts  $e$  modifiziert,  $N = N + e$ . Damit ist die Simulation für den Zeitschritt abgeschlossen. Das Schema wird beginnend bei 1. solange wiederholt, bis die gewünschte Zeitreihenlänge erreicht ist.

Das Ablaufschema 1 bis 4 steht für das hknn Modell. Für das hknn-sma Modell wird die mit dem hknn Modell modellierte Zeitreihe nach einem weiteren Bearbeitungsschritt mit dem SMA-Filter gefiltert. Für das hknn-sma Modell müssen für den Vorlauf und Nachlauf des SMA-Filters  $q \times 3$  mehr Zeitschritte zusätzlich simuliert werden. Hierbei ist  $q$  die Anzahl der SMA Koeffizienten. Diese Zeitschritte werden nach Anwendung des SMA-Filters wieder verworfen.

### 2.6.3 Erweiterung des hknn Zeitreihenmodells mit dem Symmetric Moving Average (SMA) Filter

#### Der SMA-Filter

Die mit dem hknn Zeitreihenmodell simulierte monatliche multivariate Zeitreihe sei  $W_j = (W_j^{l=1}, W_j^{l=2}, \dots, W_j^{l=v})$  mit den lokalen Zuflüssen  $l = 1, \dots, v$ . Die Zuflusszeitreihe eines lokalen Zuflusses sei  $W_j^l = (w_{t=1,s}^l, w_{t=2,s}^l, \dots, w_{t=T,s}^l)$  mit dem Monatsindex  $s = 1, \dots, 12$  zum Zeitpunkt  $t$ ,  $t = 1, \dots, T$ . Diese Zeitreihe besitzt kein überjährliches Skalierungsverhalten, das zugehörige Autokorrelogramm wird relativ schnell abklingen. Die Autokorrelation von  $W_j$  auf jährlicher Zeitskala geht daher zur Zeit  $j$  für hohe Lags (zumeist auch schon einem Lag von zwei) gegen null. Wie KOUTSOYIANNIS (2000) zeigt, kann durch Anwendung des SMA-Filters auf  $W_j$  die Autokorrelationsstruktur der simulierten Zeitreihe jene der beobachteten Zeitreihe entsprechend angepasst werden - und somit auch das überjährliche Skalierungsverhalten. Wie z.B. in Abbildung 12 zu sehen ist, kann die Zeitreihe so

modifiziert werden, dass in diesem Fall auch Autokorrelationskoeffizienten auf jährlicher Zeitskala mit einem Lag größer als eins wiedergegeben werden können.

Es sei die transformierte multivariate Zeitreihe mit SSZ Verhalten  $X_j = (X_j^{l=1}, X_j^{l=2}, \dots, X_j^{l=v})$ , mit den einzelnen Zeitreihen  $X_j^l = (x_{t=1,s}^l, x_{t=2,s}^l, \dots, x_{t=T,s}^l)$  der lokalen Zuflüsse  $l, l = 1, \dots, v$ . Der SMA-Filter kann dann durch Gleichung (3) mit beschrieben werden.

$$X_{(j-1)k+s}^l = \delta_s^l \sum_{j=-q}^q \alpha_{|j|}^l W_{(i+j-1)k+s}^l, \quad s = 1, \dots, k; l = 1, \dots, v \quad (3)$$

Hierbei ist  $\delta_s^l$  die Varianz im Monat  $s, s = 1, \dots, k$ .  $\alpha_j^l$  sind die SMA Koeffizienten. Diese können nach KOUTSOYIANNIS (2002) aus der Autokorrelationsstruktur des stochastischen Prozesses über die inverse finite Fouriertransformation abgeleitet werden. Demnach ist zur Berechnung der SMA Koeffizienten  $\alpha_j^l$  nach Gleichung (4) lediglich ein Parameter, der Hurst Koeffizient  $H$ , nötig.

$$\alpha_j^l = \frac{\sqrt{(2-2H)\gamma_0}}{3-2H} [(j+1)^{H+0.5} + (j-1)^{H+0.5} - 2j^{H+0.5}], \quad j > 0 \quad (4)$$

Der Hurst Koeffizient wird in dieser Studie mit dem Verfahren nach KOUTSOYIANNIS (2002) geschätzt.

#### Anwendung des SMA-Filters auf die synthetische Zeitreihe

Um den SMA-Filter auf die bereits simulierte multivariate Zeitreihe  $W_j$  anzuwenden, wird zunächst jede lokale Zuflusszeitreihe  $W_j^l$  auf monatlicher Basis zentriert, indem von jedem Zufluss  $w_{t,s}^l$  des Monats  $s$  der Mittelwert des jeweiligen Monats subtrahiert wird,  $\tilde{w}_{t,s=s}^l = w_{t,s=s}^l - E[w_{t=1,\dots,T,s=s}^l]$ . Auf die so saisonbereinigte Zeitreihe  $\tilde{W}_j$  kann mittels Gleichung (3) der SMA-Filter angewandt werden um  $\tilde{X}_j$  zu generieren. Nach Anwendung des SMA-Filters werden die Durchflüsse wieder zurücktransformiert um wiederum  $X_j$  zu erhalten, indem die jeweiligen monatlichen Mittelwerte zurück addiert werden,  $x_{t,s=s}^l = \tilde{x}_{t,s=s}^l + E[w_{t=1,\dots,T,s=s}^l]$ .

#### Bereinigung negativer simulierter Durchflüsse

Bei der stochastischen Simulation lokaler Zuflüsse können negative Zuflüsse entstehen. Diese müssen in einem Postprocessing entfernt werden. Das einfachste Verfahren ist, negative Zuflüsse mit einem Zuflusswert von null gleichzusetzen.

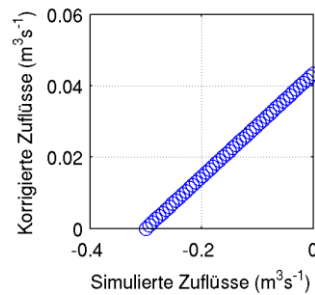


Abbildung 8: Korrektur negativer Zuflüsse für den lokalen Zufluss A bei  $Q_{0.025}^l = 0.11$  und einem minimalen simulierten Durchfluss von  $-0.3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .

Alternativ wird hier ein anderes einfaches Verfahren angewandt. Hierzu wird zunächst geprüft ob negative Zuflüsse vorliegen. Ist dies der Fall werden zunächst das 2.5 % Quantil  $Q_{0.025}^l$  des Zuflusses der beobachteten Zeitreihe, sowie das Minimum  $\tilde{x}^l = \min(X^l)$  der lokalen Zuflusszeitreihe ermittelt. Tritt ein negativer Zufluss auf, wird er nach Gleichung (5) korrigiert.

$$x_{t,korr}^l = \frac{x_t^l - \tilde{x}^l}{0 - \tilde{x}^l} \times Q_{0.025}^l \quad (5)$$

Für das hknn-sma Modell beträgt der zu korrigierende Anteil negativer Zuflüsse in Schnitt zwischen 0.3 % und 1.5 % der Länge der generierten Zeitreihe.

## 2.6.4 Auswertung der synthetisch generierten Zeitreihen

### Parameter zur Beschreibung von Defizit- und Überschussperioden

#### Maximales Defizitvolumen nach dem Folgescheitelalgorithmus $\hat{V}_{FSA}$

Der Folgescheitelalgorithmus (FSA) ist ein Verfahren zur Abschätzung des kleinsten erforderlichen Speichervolumens eines Versorgungsspeichers gegenüber beobachteter oder synthetisch generierter Zuflusszeitreihen (MANIAK 2007). Der mit dem FSA ermittelte Speicher ist so ausgelegt, dass zwar die Sollabgabe voll gewährt wird, der Speicher jedoch in der maximalen Trockenperiode dabei einmal leer läuft. Die jeweils konstante Sollabgabe wird mit dem Schwellenwert  $c_{crit}$  angegeben.

Das Verfahren beruht auf der Analyse der sequentiell wechselnden lokalen Maxima und Minima der aufsummierten Nettozuflusslinie (Zuflusszeitreihe minus Sollabgabezeitreihe). Ein Speichervolumen  $S$  welches benötigt wird um die Sollabgabe innerhalb einer Trockenperiode zu garantieren, errechnet sich dabei aus der Differenz des jeweils ersten lokalen Maxima und dem nachfolgenden lokalen Minima. Dieses Speichervolumen  $S$  ist gleich des Defizitvolumens  $V_{FSA}$  innerhalb dieses Zeitraums.

Das maximale Speichervolumen  $\hat{S}$  ist das Maximum aller errechneten Speichervolumen  $S$  die sich für alle Trockenperioden in der Zeitreihe ergeben.  $\hat{S}$  ist der kleinste erforderliche Speicher innerhalb des gesamten betrachteten Zeitraums um die Sollabgabe zu garantieren und gleichzeitig stellt gleichzeitig das maximale Defizitvolumen  $\hat{V}_{FSA}$  innerhalb der gesamten Zeitreihe dar.

Zur Berechnung von  $\hat{V}_{FSA}$  werden in dieser Studie die lokalen Zuflüsse A und B zum Gesamttalsperrenzufluss des Systems Klingenberg und Lehmühle zusammengefasst.

#### Maximale Länge der Trockenperioden $L_{DEF}$ und maximales Defizitvolumen $V_{DEF}$

Zur Bestimmung der maximalen Länge der Trockenperioden  $L_{DEF}$  werden zunächst alle Trockenperioden als Zeitabschnitte ununterbrochenen Zuflusses unter einem Schwellenwert  $c_{crit}$  bestimmt.  $L_{DEF}$  ist die maximale Länge aller Perioden mit einem Zufluss unter dem Schwellenwert  $c_{crit}$ . Analog zu  $L_{DEF}$  ist das maximale Defizitvolumen der Trockenperioden die Summe aller Absolutwerte der Differenzen zwischen dem Zufluss und dem Schwellenwert  $c_{crit}$  in einer zusammenhängenden Trockenperiode mit Zuflüssen unter  $c_{crit}$ .

#### Maximale Länge der Überschussperioden $L_{SUR}$ und maximales Überschussvolumen $V_{SUR}$

Zur Bestimmung der maximalen Länge der Überschussperioden  $L_{SUR}$  werden alle Überschussperioden als Perioden ununterbrochenen Zuflusses über einem Schwellenwert  $c_{crit}$  bestimmt.  $L_{SUR}$  ist dann die maximale Länge aller Perioden mit einem Zufluss über dem Schwellenwert  $c_{crit}$ . Analog zu  $L_{SUR}$  ist dann das maximale Überschussvolumen der Überschussperioden die Summe der aller Differenzen zwischen dem Zufluss und dem Schwellenwert  $c_{crit}$  in einer zusammenhängenden Überschussperiode mit Zuflüssen über dem Schwellenwert  $c_{crit}$ .

#### Schwellenwert $c_{crit}$

Zur statistischen Auswertung von Trockenperioden und Feuchtperioden wird als Schwellenwert  $c_{crit}$  eine konstante Abgabe von  $1,05 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  veranschlagt. Dies entspricht der maximalen Abgabe der Talsperre Klingenberg von  $1,00 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  zusammen mit der Wildbettaabgabe der Talsperre Klingenberg von  $0,05 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Durch die Reduktion des Zuflusses um ca. 50% in der letzten Zeitscheibe 2071-2100 muss der Schwellenwert reduziert werden, da mit dem FSA sonst keine Lösung mehr existiert. In dieser Zeitscheibe wird  $c_{crit}$  auf etwa 85% des Talsperrengesamtzuflusses der Talsperren Klingenberg und Lehmühle,  $0,65 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , festgesetzt.

### *Erläuterungen zu den Zeitreihenmodellierungen unter rezenten klimatischen Bedingungen*

Der Datensatz der von der Landestalsperrenverwaltung Sachsen zu Verfügung für die vier Zeitreihen der beobachteten lokalen Zuflüsse gestellt wurde besitzt eine Länge von 86 Jahren. Um die Performance des Zeitreihenmodells zu testen, wird zunächst multivariat ein Satz aus vier 10.000 jährigen Zeitreihen generiert. Diese werden anschließend in je 116 einzelne (als unabhängig betrachtete) 86 Jahre lange Zeitreihe unterteilt. Somit kann eine Stichprobe von Zeitreihen mit gleicher Länge wie die beobachtete zum Vergleich mit den Beobachtungsdaten herangezogen werden. Der Median aus den 116 verkürzten Zeitreihen verhält sich ähnlich der 10.000 jährigen Zeitreihe und lässt Rückschlüsse auf die Übereinstimmung der ursprünglichen 10.000 jährigen Zeitreihe mit den Beobachtungsdaten zu, so dass diese nicht gesondert untersucht werden muss.

### *Erläuterungen zu den Zeitreihenmodellierungen unter projizierten klimatischen Bedingungen*

Abweichend zum Vorgehen unter rezenten klimatischen Bedingungen werden die generierten 10.000 jährigen multivariaten Zeitreihe in 333 (als unabhängig betrachtete) Zeitreihen zu je 30 Jahren unterteilt. Somit lässt sich ein direkter Vergleich der verkürzten Zeitreihe zur Datenbasis der 10 Realisierungen über jeweils 30 Jahren schließen.

### *Boxplots*

Boxplots geben einen Überblick über die Verteilung von Daten. Der rote Strich im Inneren der blauen Box (a) kennzeichnet den Median  $q_2$ , der obere Abschluss der blauen Box (b) kennzeichnet das 75 % Quantil  $q_3$ , der untere Abschluss der blauen Box das 25 % Quantil  $q_1$ . Die blaue Box kennzeichnet somit den Interquantilabstand, innerhalb dessen sich 50% der Daten befinden. Der obere und untere Whisker (c) markieren den Bereich des 1,5 fachen Interquantilabstandes. Rote Kreuze (d) markieren „Ausreißer“, die größer als  $q_3 + 1,5 \times (q_3 - q_1)$ , oder kleiner als  $q_1 - 1,5 \times (q_3 - q_1)$  sind. Sind die Daten näherungsweise Normalverteilt, befinden sich in etwa 99 % der Daten innerhalb der Whisker.

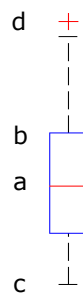


Abbildung 9: Schema eines Boxplots

## 3. Ergebnisse

### 3.1 Zeitreihengenerierung für rezente klimatische Bedingungen und für die Reanalysezeiträume der regionalen Klimamodelle

#### *Zeitreihengenerierung für rezente klimatische Bedingungen (1921-2007)*

Wie in Abbildung 10 und Abbildung 11 zu sehen, werden die ersten drei statistischen Momente Mittelwert, Varianz (angegeben als Standardabweichung), sowie die Schiefe vom hknn-sma Modell gut abgebildet. Statistische Parameter einzelner Monate werden zwar leicht über- und unterschätzt, jedoch ist kein genereller Bias der Parameter festzustellen. Korrekt wiedergegeben wird das Maximum des mittleren Zuflusses zur Schneeschmelze im April und die Phase niedrigen Zuflusses in den Sommer und Herbstmonaten (Abbildung 10, a). Während der Schneeschmelze im April werden die höchsten Standardabweichungen erreicht (Abbildung 10, c). Durch die Extremwerte des Hochwassers 2002 ergibt sich für den Monat August eine hohe Schiefe (Abbildung 10, b).

Die Autokorrelation  $r_1$  auf jährlicher Zeitskala mit einem Lag von eins wird leicht unterschätzt. So ist unter dem hknn-sma Modell der Median von  $r_1$  des lokalen Zuflusses A mit 0,26 kleiner als in der Beobachtung mit 0,38. Für den lokalen Zufluss C ist  $r_1$  mit 0,19 in den synthetischen Zeitreihen gegenüber einem  $r_1$  von 0,30 der beobachteten Zeitreihe ebenfalls zu gering. Selbst die Maximalwerte  $r_1$  der synthetischen Zeitreihen sind geringer als in den Beobachtungen.

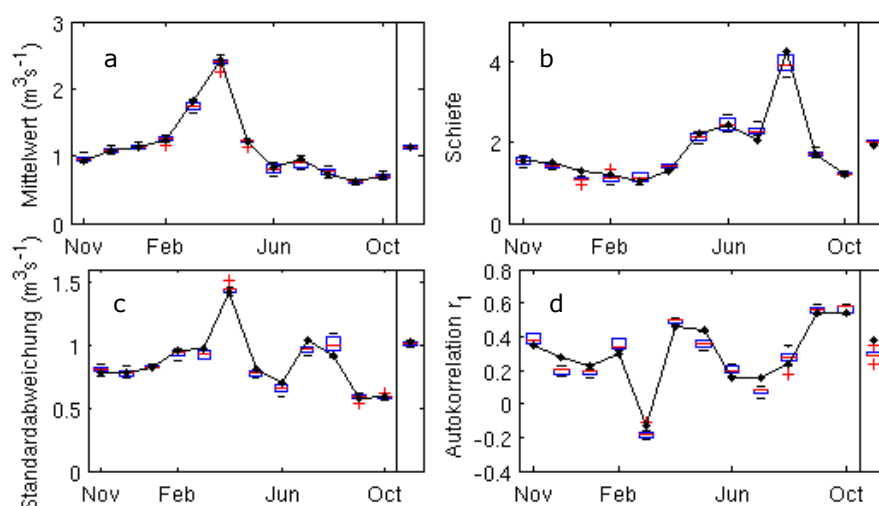


Abbildung 10: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte (Mittelwert (a), Standardabweichung (c), Schiefe (b), Autokorrelationskoeffizient  $r_1$  (d)) für den lokalen Zufluss A (Datengrundlage 1921-2007). Statistiken der beobachteten Zuflüsse sind als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hknn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

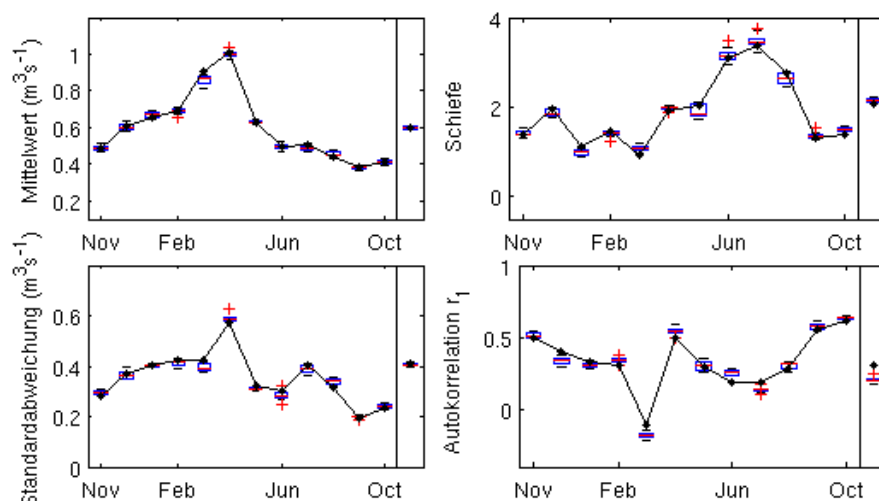


Abbildung 11: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte (Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe, Autokorrelationskoeffizient  $r_1$ ) für den lokalen Zufluss C (Datengrundlage 1921-2007). Statistiken der beobachteten Zuflüsse sind als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hknn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

Die Unterschätzung der Autokorrelation auf jährlicher Zeitskala ist auch in dem Autokorrelogramm ersichtlich. Für den lokalen Zufluss A zeigt Abbildung 12, links, das Autokorrelogramm der beobachteten Zuflüsse in Schwarz, des hknn Modells in blau und des hknn-sma Modells in rot. Deutlich erkennbar ist die schnelle exponentielle Abnahme der Autokorrelationskoeffizienten für das hknn Modell. Lediglich bei Lag 1 auf jährlicher Zeitskala ist der Autokorrelationskoeffizient mit  $r_1 = 0.1$  deutlich größer als null. Für das hknn-sma Modell sinkt das Autokorrelogramm langsamer exponentiell ab als unter dem hknn Modell. So können die Autokorrelationskoeffizienten der ersten vier Lags gut approximiert werden. Auf monatlicher Zeitskala geben sowohl das hknn Modell als auch das hknn-sma Modell das Autokorrelogramm der beobachteten Zuflüsse, siehe Abbildung 12 rechts, gut wieder. Beide Modelle unterschätzen jedoch die Autokorrelation eines Monats zum selben Monat vor einem Jahr und vor zwei Jahren (Lag 12, Lag 24).

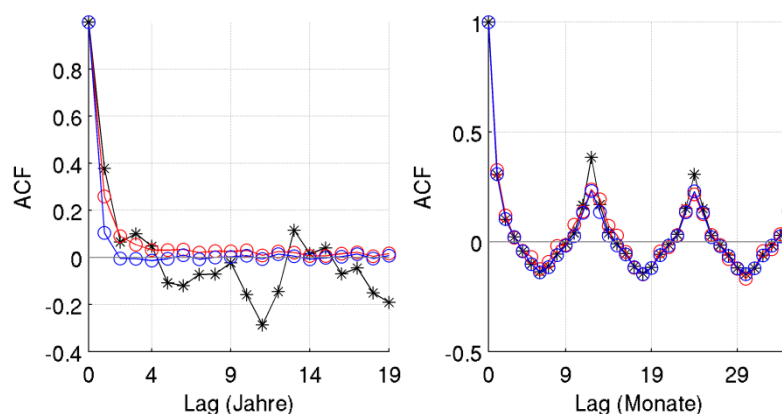


Abbildung 12: Autokorrelationsfunktionen für den rezenten klimatischen Zustand auf jährlicher Skala (links) und monatlicher Skala (rechts) für den lokalen Zufluss A (Datengrundlage 1921-2007). Beobachtete Zuflüsse sind in schwarz, simulierte Zuflüsse sind in rot (hknn-sma) und blau (hknn) dargestellt.

Tabelle 3 gibt einen Überblick über die mit dem Verfahren nach KOUTSOYIANNIS (2002) geschätzten Hurst Koeffizienten für die beobachteten und die synthetischen Zuflüsse auf jährlicher Zeitskala. Die simulierten Hurst Koeffizienten aller lokalen Zuflüsse liegen leicht über denen der beobachteten.

teten Zuflüsse. Eine Signifikanz des Unterschieds ist jedoch hinsichtlich der Unsicherheit bei der Parameterschätzung von  $H$  fraglich, so dass von einer Übereinstimmung der simulierten und beobachteten Parameter ausgegangen werden kann. Der lokale Zufluss A besitzt demnach mit 0,63 den höchsten Hurst Koeffizienten, der des lokalen Zuflusses B ist mit 0,61 nahezu ebenso groß. Beide lokalen Zuflüsse C und D besitzen mit 0,57 und 0,54 nur sehr schwache Hurst Koeffizienten.

Tabelle 4: Vergleich der geschätzten Hurst Koeffizienten  $H$  für die beobachteten und simulierten Zuflusszeitreihen (hknn-sma Modell) der lokalen Zuflüsse A, B, C und D.

Lokaler Zufluss	Hurst Koeffizient $H$			
	A	B	C	D
Beobachtet	0.63	0.61	0.57	0.54
Simuliert	0.66	0.63	0.60	0.58

Da das hknn-Modell als multivariates Zeitreihenmodell betrieben wird, kann die Korrelationsstruktur mehrerer Zeitreihen bei der Zeitreihengenerierung berücksichtigt werden. Diese sind hier Zeitreihen der vier lokalen Zuflüsse. Abbildung 13 zeigt die simulierten Kreuzkorrelationen im Vergleich mit denen der beobachteten Zuflüsse. Der Korrelationskoeffizient A-B mit einem Lag von null ist hier für Juni und Juli kleiner als 1, da für die lineare Regression zur Modellierung des lokalen Zuflusses B (Abschnitt 2.1) Zuflüsse sowohl von Lag 0 als auch von Lag 1 verwendet wurde. Die in Abbildung 13 gezeigte Korrelation A-B gilt für Lag 0, so dass nicht die Varianz erklärt werden kann, die von Lag 1 beschrieben wird.

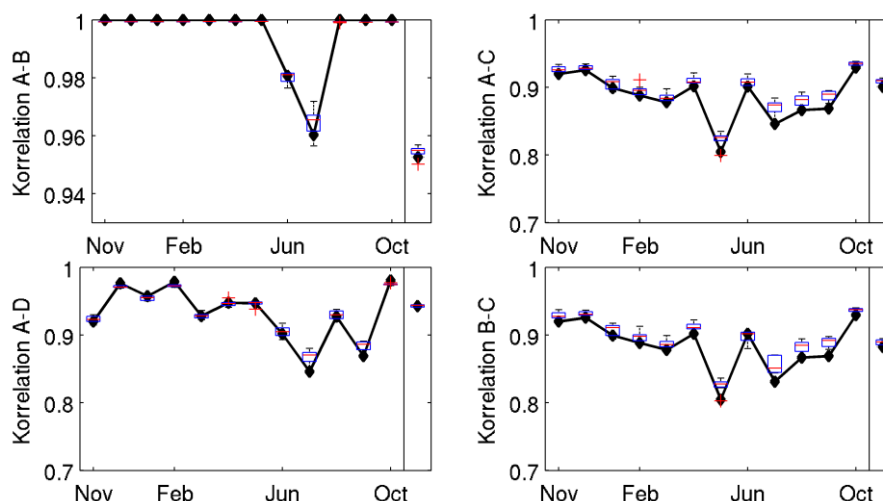


Abbildung 13: Vergleich monatlicher und jährlicher Kreuzkorrelationen zwischen ausgewählten lokalen Zuflüssen (Datengrundlage 1921-2007). Statistiken der beobachteten Zuflüsse sind als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hknn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

Die marginale Dichtefunktion der Zuflüsse einzelner Monate ist eine weitere wichtige statistische Eigenschaft die für eine möglichst gute Abbildung des hydrologischen Zuflussregimes gut abgebildet werden sollte. Abbildung 14 zeigt die mit einem Kernel-Density Estimator (KDE) geschätzten marginalen Dichtefunktionen  $J_K$  der Monate Januar (a), April (b), Juni (c) und Oktober (d). Die Dichteverteilungen aller Monate werden in guter Annäherung wiedergegeben. Die Simulation der Zuflüsse im Oktober weicht von der Beobachtung ab. Hier kann das Dichtemaximum der Zuflüsse nicht abgebildet werden. Die simulierte  $J_K$  besitzt einen wesentlich glatteren monomodalen Verlauf



als die beobachtete Dichtefunktion mit leicht bimodaler Ausprägung. Weiterhin sind in Abbildung 14 aufgetretene beobachtene Zuflüsse an den 50 Stützstellen des KDE unten als schwarze Punkte wiedergegeben. Für die synthetische Zeitreihe sind diese oben als graue Punkte wiedergegeben. Ein Vergleich zeigt, dass in der synthetischen Zeitreihe Zuflüsse in Stützstellen auftreten die für die Beobachtung unbesetzt sind. Es werden also neue, zuvor unbeobachtete Zuflüsse von Modell simuliert. Das hknn-sma Modell ist demnach in der Lage schiefe und nicht normalverteilte marginale Verteilungen gut wiederzugeben.

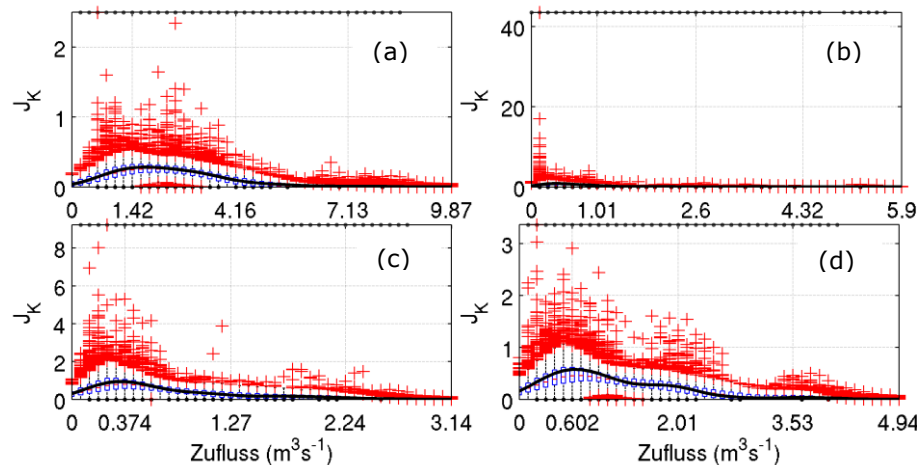


Abbildung 14: Marginale Dichtefunktionen  $J_K$  der Zuflüsse der Monate Januar (a), April (b), Juni (c) und Oktober (d) für den lokalen Zufluss A.  $J_K$  der beobachteten Zuflüsse ist als schwarze Linie dargestellt. Boxplots zeigen die marginalen Dichtefunktionen der simulierten Zuflüsse.

Das maximale Defizitvolumen  $\hat{V}_{FSA}$  nach dem Folgescheitelalgorithmus ist für die maßgebende Trockenperiode  $35,2 \text{ hm}^3$  unter dem hknn-sma Modell und  $21,0 \text{ hm}^3$  unter dem hknn Modell ohne SMA Filter.  $13,9 \text{ hm}^3$  ist das Defizitvolumen  $\hat{V}_{FSA}$  für die beobachteten Zuflüsse, siehe Abbildung 15. Die längste beobachtete zusammenhängende Trockenperiode  $L_{DEF}$  mit Zuflüssen unter  $1,05 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  erstreckt sich über 22 Monate. Dies ist ebenfalls die simulierte maximale Trockenperiodenlänge für das hknn Modell und das hknn-sma Modell. Das maximale Defizitvolumen  $\hat{V}_{FSA}$  unter dem Schwellenwert von  $1,05 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  ist während dieser Zeit  $1,38 \text{ hm}^3$  für das hknn-sma,  $1,15 \text{ hm}^3$  für das hknn Modell, sowie  $1,13 \text{ hm}^3$  für die beobachteten Zuflüsse. Sowohl die beobachteten, als auch die simulierten empirischen kumulativen Verteilungsfunktionen der Länge der Trockenperioden  $L_{DEF}$ , des Defizitvolumens  $V_{DEF}$ , der Zuflüsse unter  $1,05 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , als auch des  $V_{FSA}$  werden nach Abbildung 15 gut wiedergegeben.

Dies ist ebenso für die empirischen kumulativen Verteilungsfunktionen der äquivalenten Statistiken für die Überschussperioden der Fall. Auch hier kann die beobachtete empirische kumulative Verteilung gut nachgebildet werden. Die simulierten Extreme mit hohen Unterschreitungswahrscheinlichkeiten sind deutlich größer als in der Beobachtung. So verlängert sich die maximale Überschussperiode  $L_{SUR}$  von 12 Monate auf 22 Monate für das hknn ohne Erweiterung durch den SMA-Filter und auf 30 Monate für das hknn-sma Modell. Das maximale Überschussvolumen  $V_{SUR}$  erhöht sich dabei von beobachteten  $2,36 \text{ hm}^3$  auf  $3,23 \text{ hm}^3$  für das hknn Modell und  $3,9 \text{ hm}^3$  für das hknn-sma Modell. Bis auf die Länge der Trockenperiode werden neue Extremwerte für die einzelnen Statistiken simuliert, wobei das hknn geringere Extremwerte liefert als mit dem Postprocessing durch den SMA-Filter im hknn-sma Modell.



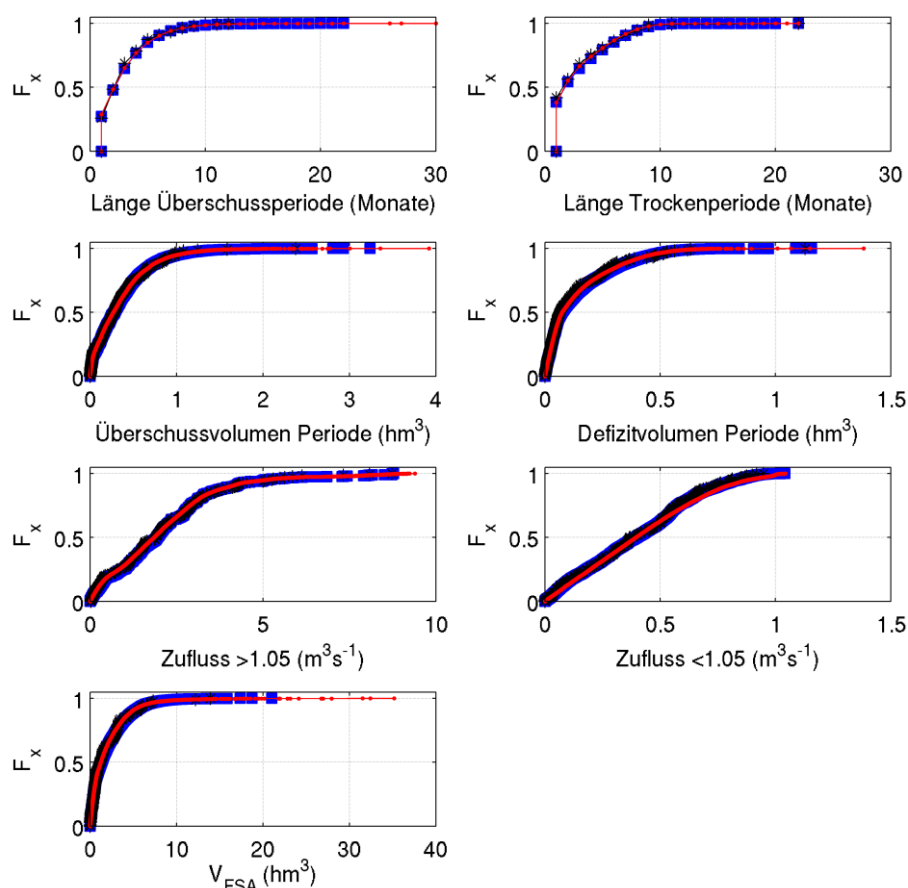


Abbildung 15: Empirische kumulative Verteilungsfunktionen  $F_x$  unterschiedlicher Parameter für Trockenperioden und Überschussperioden. Als Schwellenwert ist  $1,05 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  angesetzt, der Zufluss ist die Summe der Zuflüsse A und B. Schwarz dargestellt sind die beobachteten Zuflüsse, blau die Zuflüsse des hkn Modells und rot die Zuflüsse des hkn-sma Modells. Der betrachtete Zeitraum ist 1921-2007.

#### Zeitreihengenerierung für rezente klimatische Bedingungen (1961-1990)

Wird die Datengrundlage zum antrainieren des KNN auf denselben Zeitraum wie der Reanalysezeitraum (1961-1990) beschränkt, ergibt sich für das hkn-sma Modell nach Abbildung A5 ein maximales Defizitvolumen  $\hat{V}_{FSA}$  von  $40,8 \text{ hm}^3$ . Die maximale Trockenperiodenlänge  $L_{DEF}$  in der beobachteten Zuflusszeitreihe des Zuflusses ist nach wie vor 22 Monate, da die maßgebende beobachtete Trockenperiode in den Jahren 1962-1963 auch hier im Datensatz enthalten ist. Mit dem hkn Modell werden für  $L_{DEF}$  28 Monate simuliert, für das hkn-sma Modell sind dies 30 Monate. Das maximale Defizitvolumen  $V_{DEF}$  ist für die Beobachtung hier ebenso  $1,13 \text{ hm}^3$ , mit dem hkn Modell werden  $1,44 \text{ hm}^3$  erreicht, das hkn-sma Modell generiert  $1,88 \text{ hm}^3$ . Die Statistiken der Überschussperioden sind entsprechend extrem, die maximalen Längen der Überschussperioden betragen 33 Monate für das hkn Modell und 30 Monate für das hkn-sma Modell. Hierbei werden Überschussvolumen von  $4,48 \text{ hm}^3$  (hkn), beziehungsweise  $4,14 \text{ hm}^3$  (hkn-sma) erreicht. Die Statistiken der Überschuss- und Defizitperioden sind extremer als die der Zeitreihenmodellierung für die Jahre 1921-2007. Da jedoch die Modellierung des stochastischen Prozesses selbst über 10.000 Jahre noch abweichenden Ergebnissen führen kann, kann nicht darauf geschlossen werden, dass der verkürzte Zeitraum extremere Zustände darstellt.

Der Vergleich der Autokorrelogramme der beobachteten Zeitreihe und der mit hkn-sma generierten Zeitreihe auf jährlicher Zeitskala für den lokalen Zufluss A, Abbildung A3, zeigt einen deutlich von null verschiedenen Autokorrelationskoeffizienten  $r_1$  bei Lags eins von 0,36 bzw. 0,32; sowie einen deutlich unterschätzten  $r_1$  von 0,12 für das hkn Modell. Während die beobachtete Zeitreihe in den folgenden Lags von negativen Autokorrelationskoeffizienten zurück zu positiven wechselt,

klings das hknn-sma Modell langsam exponentiell ab, während das hknn Modell nach Lag-2 so gut wie keine Autokorrelation mehr aufweist.

Für den Monat Oktober ergibt sich für die marginale Dichteverteilung nach Abbildung A4 dasselbe Bild wie für die Zeitreihenmodellierung des Zeitraums 1921-2007 – hier kann die bimodale Dichteverteilung nicht wiedergegeben werden. Die Kreuzkorrelation zwischen den lokalen Zuflüssen wird im Allgemeinen gut wiedergegeben, zwischen A-B und A-D wird allerdings die Korrelation zwischen den Zuflüssen im Mai deutlich unterschätzt, siehe Abbildung A1. Die innerjährliche Autokorrelation für den lokalen Zufluss A wird ebenfalls unterschätzt. Das Modell scheint also Probleme mit der Abbildungstreue dieses Monats zu haben.

#### Reanalysezeitraum 1961-1990 - WETTREG2010

Wie bereits in Abschnitt 2.3 beschrieben wird aus den trendbereinigten 10 eigenständigen Realisationen ein Gesamtdatensatz generiert. Anhand des Gesamtdatensatzes wird das KNN des Zeitreihenmodells trainiert. Somit kann eine Möglichst große Datengrundlage zum anlernen zur Verfügung gestellt werden, die möglichst viele hydrologische Zustände abdeckt.

In Abbildung 16 und Abbildung 17 sind die einzelnen statistischen Parameter (Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe und Lag-1 Autokorrelation) der 10 Realisierungen in hellgrau dargestellt. Die Parameter des Gesamtdatensatzes sind in schwarz dargestellt. Der Mittelwert, die Autokorrelation  $r_1$  und die Standardabweichung des Gesamtdatensatzes geben das mittlere Verhalten der Realisationen wieder. Die Schiefe des Gesamtdatensatzes ist für die Sommer- und Herbstmonate höher als in den zehn einzelnen Realisationen.

Das hknn-sma Modell kann auch hier ohne Bias die statistischen Eigenschaften aller lokalen Zuflüsse des Gesamtdatensatzes wiedergeben. Die Lag 1 Autokorrelation  $r_1$  auf jährlicher Zeitskala wird für den lokalen Zufluss A unterschätzt, für den lokalen Zufluss C wird dieser korrekt abgebildet.

Im Allgemeinen ist die Spannbreite der statistischen Parameter der synthetischen Zeitreihen geringer als die Spannbreite der statistischen Parameter der zehn Realisationen aus WETTREG2010. Die Boxplots nach Abbildung 16 und Abbildung 17 erstrecken sich nicht über den gesamten Bereich, wie dieser durch die Realisationen aufgespannt wird.

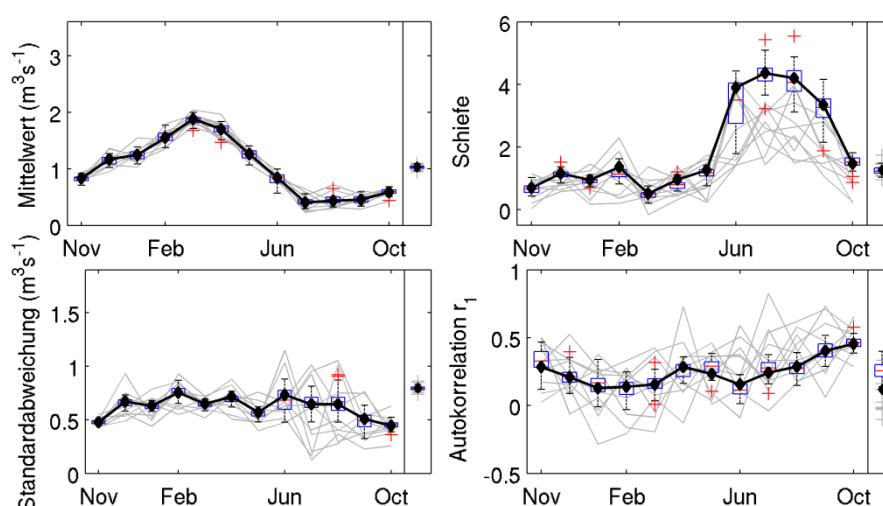


Abbildung 16: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte (Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe, Autokorrelationskoeffizient  $r_1$ ) für den lokalen Zufluss A für den Reanalysezeitraum 1961-1990, WETTREG2010. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Statistiken der simulierten Zuflüsse des hknn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

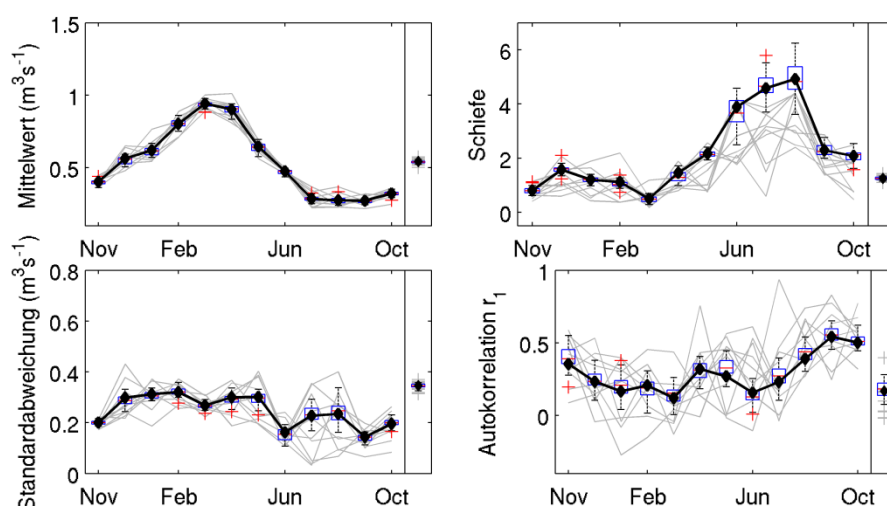


Abbildung 17: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte (Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe, Autokorrelationskoeffizient  $r_1$ ) für den lokalen Zufluss C für den Reanalysezeitraum 1961-1990, WETTREG2010. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Statistiken der simulierten Zuflüsse des hkn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

Der Datensatz der für die Zeitreihensimulationen unter rezenten klimatischen Verhältnissen wurde teilweise durch den Einsatz von linearer Regression aufgestellt. Für die projizierten klimatischen Verhältnisse entstammen die Daten des Talsperreneinzugsgebietes Klingenberg und Lehmühle den Simulationen mit dem Wasserhaushaltsmodell WaSiM-ETH. Wie in Abbildung 18 zu sehen ist, wird daher eine realistischere Korrelation zwischen den lokalen Zuflüssen A und B erzielt. Während die Kreuzkorrelationen auf jährlicher Zeitskala zumeist leicht überschätzt werden, wird die Kreuzkorrelation im Monat September zwischen A-C und A-D deutlich unterschätzt.

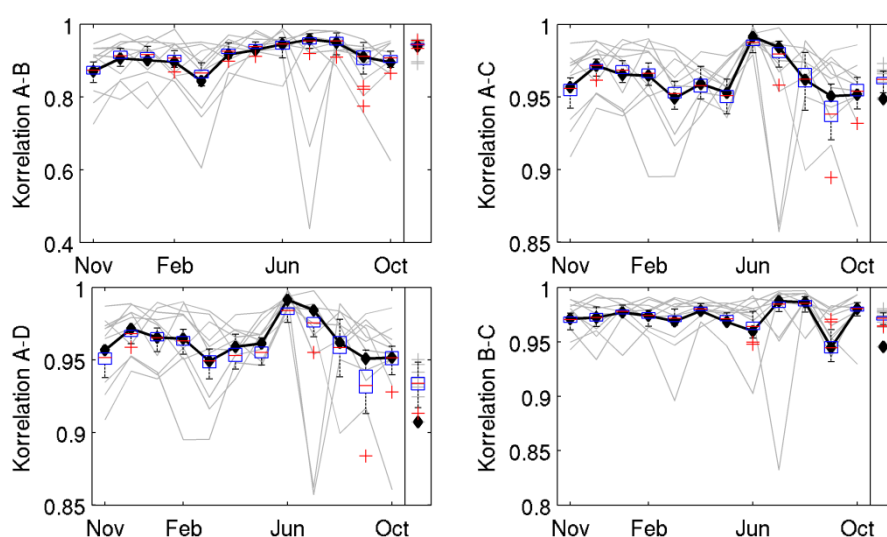


Abbildung 18: Vergleich ausgesuchter monatlicher und jährlicher Kreuzkorrelationen zwischen lokalen Zuflüssen des Zeitraums 1961-1990 für das regionale Klimamodell WETTREG2010. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hkn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

Die mit dem hknn-sma simulierten marginalen Dichtefunktionen  $J_K$  des lokalen Zuflusses A sind für den Zeitraum 1961-1990 unter CLM in Abbildung 19 abgebildet. Auch hier können die marginalen Dichtefunktionen der Beobachtung in den synthetischen Zeitreihen erhalten werden, wenn der Median das Dichtemaximum zumeist leicht unterschätzt. Im Gegensatz zu den beobachteten Zuflüssen unter rezenten klimatischen Bedingungen ist die Dichteverteilung der Zuflüsse im Oktober aus den Realisierungen unimodal.

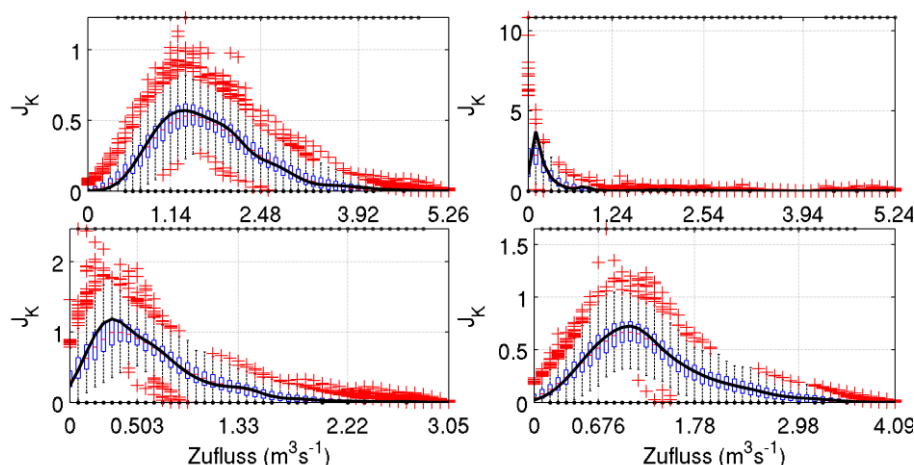


Abbildung 19: Marginale Dichtefunktionen  $J_K$  der Zuflüsse des Reanalysezeitraums 1961-1990, WETTREG2010, in den Monaten Januar (oben links), April (oben rechts), Juni (unten links) und Oktober (unten rechts) für den lokalen Zufluss A.  $J_K$  der beobachteten Zuflüsse ist als schwarze Linie dargestellt. Boxplots zeigen die marginalen Dichtefunktionen der simulierten Zuflüsse.

Das Autokorrelogramm auf jährlicher Zeitskala, Abbildung 20, weist für den Gesamtdatensatz (Magenta) eine, gegenüber der Beobachtung, deutlich geringere Autokorrelationsstruktur des lokalen Zuflusses A auf. Die Autokorrelogramme der einzelnen Realisierungen (grau) kein einheitliches Verhalten, die Autokorrelationskoeffizienten einzelner Lags weisen insgesamt eine hohe Variabilität auf. Die Unsicherheit des Autokorrelogramms durch die willkürliche sequentielle Anordnung der Realisierungen ist für die ersten Lags relativ gering und nimmt für hohe Lags zu. Das Autokorrelogramm des hknn Modells liegt für die Lags eins und zwei am unteren Rand des Unsicherheitsbereichs und unterschätzt die Autokorrelationskoeffizienten des Gesamtdatensatzes. Auf der monatlichen Zeitskala zeigt das hknn-sma Modell höhere Autokorrelationskoeffizienten für die Lags 12 und 24, diese sind jedoch innerhalb der Bandbreite der Autokorrelationskoeffizienten der einzelnen Realisierungen.

Die  $L_{DEF}$  der maßgebenden Defizitperiode für das hknn-sma Modell sinkt nach Abbildung 21 im Vergleich zum hknn Modell von 21 Monate auf 17 Monate. Gleichzeitig bleibt  $V_{DEF}$  zwischen beiden Modellen mit  $1,0 \text{ hm}^3$  konstant. Im Vergleich mit den 10 Realisationen (Beobachtung) lassen sich lediglich ein  $L_{DEF}$  von 10 Monaten und eine  $V_{DEF}$  von  $0,6 \text{ hm}^3$  ermitteln. Das maximale Defizitvolumen nach dem Folgescheitelalgorithmus  $\hat{V}_{FSA}$  steigt nach dem filtern der hknn Ergebniszeitreihe von  $14,2 \text{ hm}^3$  auf  $30,3 \text{ hm}^3$  für das hknn-sma Modell an. Auf der Überschuss-Seite bleibt die maximale Länge der Überschussperioden  $L_{SUR}$  für die Beobachtung und die beiden Modellen konstant bei 21 Monaten.  $V_{SUR}$  erhöht sich von  $2,3 \text{ hm}^3$  in der Beobachtung von  $2,7 \text{ hm}^3$  (hknn) sukzessiv auf  $3,2 \text{ hm}^3$  (hknn-sma).

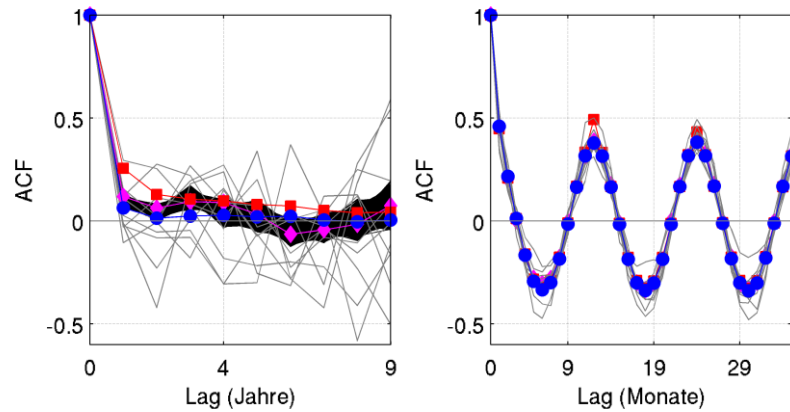


Abbildung 20: Autokorrelogramm auf jährlicher Zeitskala (links) und monatlicher Zeitskala (rechts) für den Zeitraum 1961-1990, WETTREG2010. In grau sind die Autokorrelogramme der zehn einzelnen Realisationen dargestellt, in schwarz die Bandbreite aus den Rekombinationen des Gesamtdatensatzes. Weiterhin sind dargestellt: hknn-sma Modell (rot), hknn Modell (blau) und verwendeter Gesamtdatensatz (magenta).

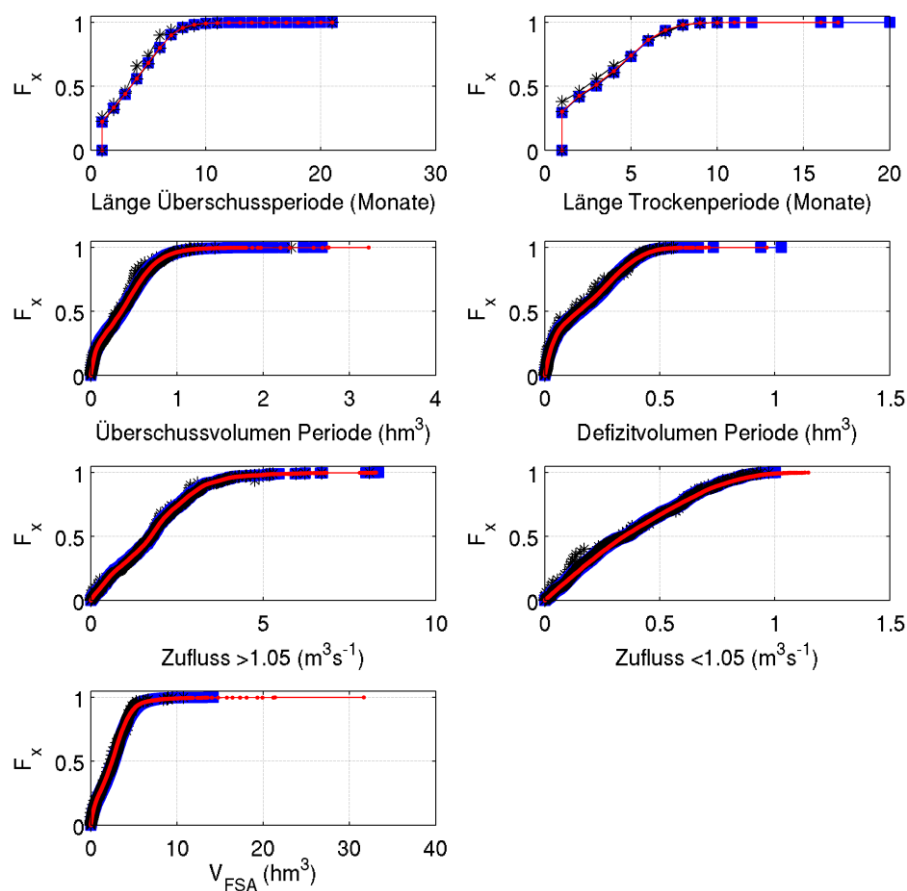


Abbildung 21: Empirische kumulative Verteilungsfunktionen  $F_x$  unterschiedlicher Parameter für Trockenperioden und Überschussperioden (Reanalysezeitraum 1961-1990, WETTREG2010). Als Schwellenwert ist  $1,05 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  angesetzt, der Zufluss ist die Summe der lokalen Zuflüsse A und B. Schwarz dargestellt sind die beobachteten Zuflüsse, blau die Zuflüsse des hknn Modells und rot die Zuflüsse des hknn-sma Modells.

### Reanalysezeitraum 1961-1990 - CLM

Die Datengrundlage des regionalen Klimamodells CLM besteht aus zwei Realisierungen und ist somit deutlich geringer als für WETTERG2010. Wie bereits in Abschnitt 2.3 beschrieben wird aus den zwei trendbereinigten Realisationen ein Gesamtdatensatz generiert. Anhand des Gesamtdatensatzes wird das KNN des Zeitreihenmodells trainiert. Somit kann eine möglichst große Datengrundlage zum anlernen zur Verfügung gestellt werden, die möglichst viele hydrologische Zustände abdeckt.

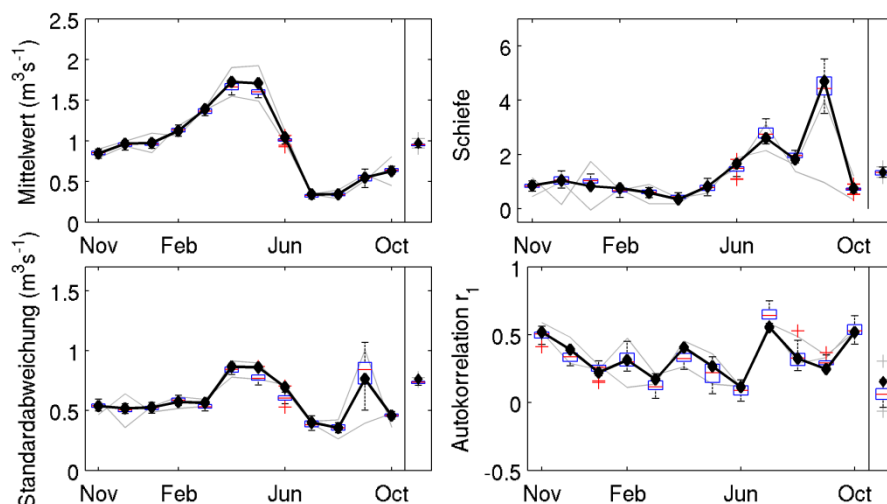


Abbildung 22: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte (Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe, Autokorrelationskoeffizient  $r_1$ ) für den lokalen Zufluss A für den Reanalysezeitraum 1961-1990, CLM. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Statistiken der simulierten Zuflüsse des hkn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

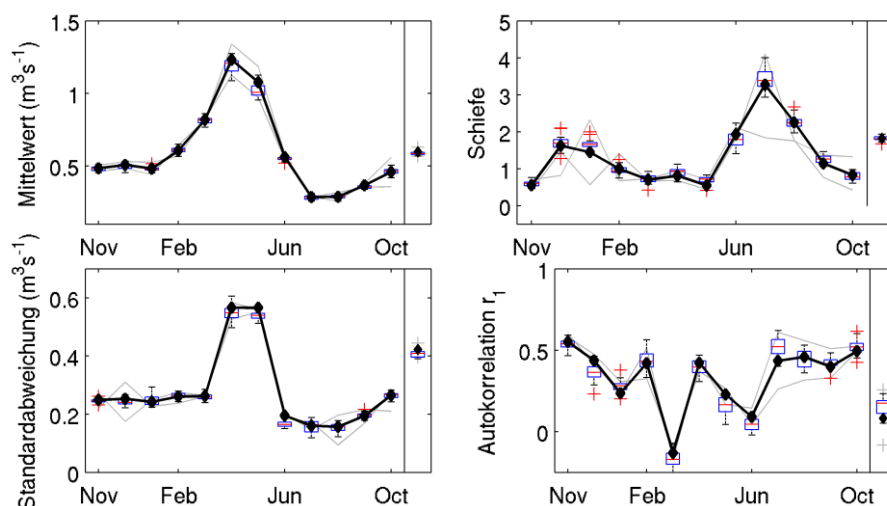


Abbildung 23: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte (Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe, Autokorrelationskoeffizient  $r_1$ ) für den lokalen Zufluss C für den Reanalysezeitraum 1961-1990, CLM. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Statistiken der simulierten Zuflüsse des hkn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.



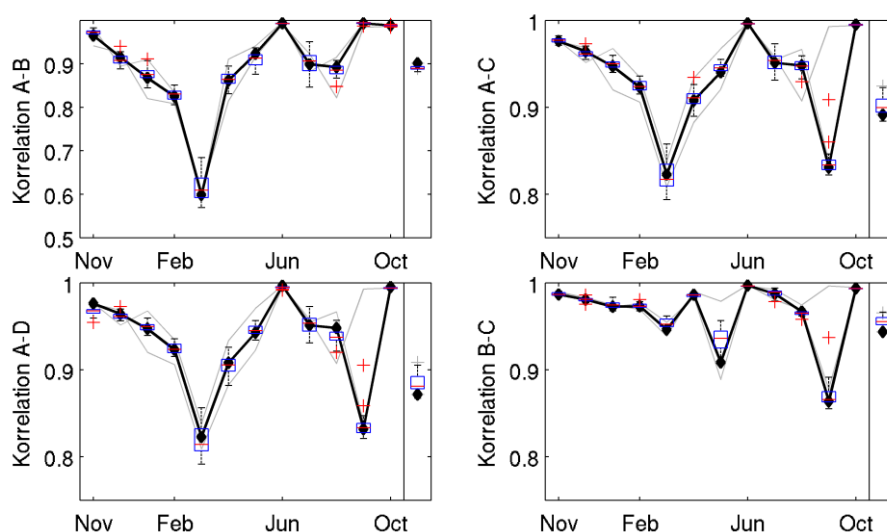


Abbildung 24: Vergleich ausgesuchter monatlicher und jährlicher Kreuzkorrelationen zwischen lokalen Zuflüssen des Zeitraums 1961-1990 für das regionale Klimamodell CLM. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Statistiken der simulierten Zuflüsse des hkn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

Aus Abbildung 22, Abbildung 23 und Abbildung 24 ist geben die Parameter des Gesamtdatensatzes der lokalen Zuflüsse A und C für den Mittelwert, die Standardabweichung, die innerjährlichen Autokorrelation mit Lag-1, sowie die Kreuzkorrelation ein mittleres Verhalten der beiden Realisationen wieder. Die vom hkn-sma Modell generieren Zeitreihen bilden alle statischen Parameter zufriedenstellend ab. Für den Monat Juli wird für beide lokale Zuflüsse A und B  $r_1$  überschätzt, für den Monat Oktober unterschätzt. Für den lokalen Zufluss A wird  $r_1$  auf jährlicher Zeitskala leicht unterschätzt, für den lokalen Zufluss C leicht überschätzt. Wiederum kann dem hkn-sma Modell eine gute Performance in der Wiedergabe der betrachteten statistischen Parameter zugesprochen werden.

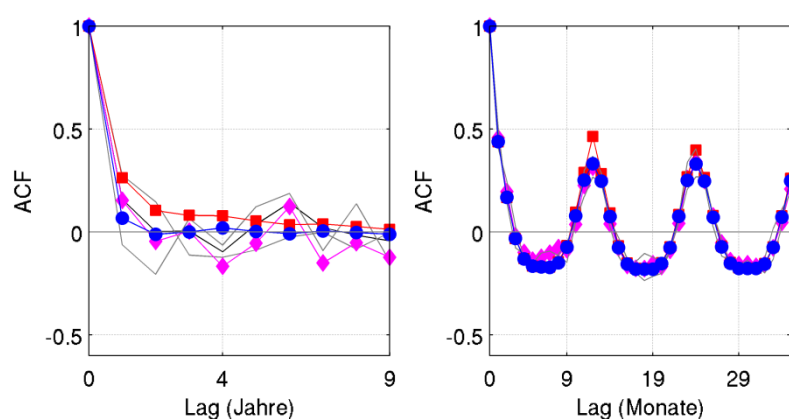


Abbildung 25: Autokorrelogramm auf jährlicher Zeitskala (links) und monatlicher Zeitskala (rechts) für den Zeitraum 1961-1990, CLM. In grau sind die Autokorrelogramme der zehn einzelnen Realisationen dargestellt, in schwarz die Bandbreite aus den Rekombinationen des Gesamtdatensatzes. Weiterhin sind dargestellt: hkn-sma Modell (rot), hkn Modell (blau) und verwendeter Gesamtdatensatz (magenta).

Das Autokorrelogramm des Gesamtdatensatz des Reanalysezeitraums des regionalen Klimamodells CLM auf jährlicher Zeitskala (Abbildung 25) weist im Vergleich zum Autokorrelogramm der beobachteten Zeitreihe für den Zeitraum 1921-2007 (Abbildung 12) eine deutlich geringere Autokorrelationsstruktur auf. Das Autokorrelogramm des hknn-sma Modells folgt hier dem einer Realisierung, liegt jedoch über dem Autokorrelogramm des Gesamtdatensatzes. Da nur zwei Realisierungen vorhanden sind, ist der Unsicherheitsbereich, der sich durch die Anordnung der Realisationen im Gesamtdatensatz ergibt, sehr gering.

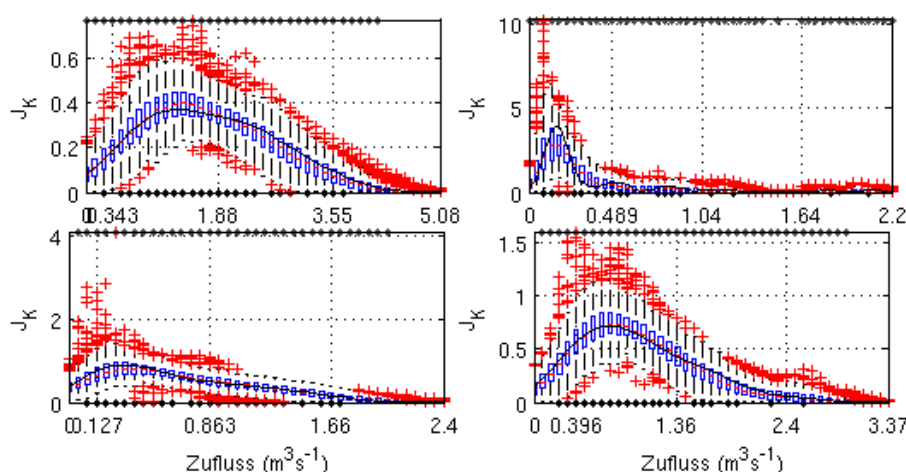


Abbildung 26: Marginale Dichtefunktionen  $J_K$  der Zuflüsse der Monate Januar (oben links), April (oben rechts), Juni (unten links) und Oktober (unten rechts) für den lokalen Zufluss A (Reanalysezeitraum 1961-1990, CLM).  $J_K$  der beobachteten Zuflüsse ist als schwarze Linie dargestellt. Die Boxplots zeigen die Statistiken der marginalen Dichtefunktionen der simulierten lokalen Zuflüsse.

Die marginale Dichtefunktion  $J_K$  der mit dem hknn-sma generierten Zuflüsse im April weisen nach Abbildung 26 eine geringere Schiefe als die Beobachtung auf und überschätzen das Dichtemaximum. Der Gesamtdatensatz des regionalen Klimamodells CLM ist ohne leicht bimodale Verteilung, wie diese im selben Zeitraum in den Beobachtungsdaten der Talsperrenzuflüsse (Abbildung 14) im Oktober vorhanden ist.

Die maximalen Defizitvolumen nach dem Folgescheitelalgorithmus  $\hat{V}_{FSA}$  der simulierten Zeitreihen ergeben sich zu 22,1 hm<sup>3</sup> für das hknn Modell und 28,7 hm<sup>3</sup> für das hknn-sma Modell (siehe Abbildung 27). Aus den zwei Realisationen des CLM Modells ergibt sich im Gesamtdatensatz ein  $\hat{V}_{FSA}$  von 11,3 hm<sup>3</sup>. Die maximale Länge der Trockenperioden unter 1,05 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> ist für das hknn Modell 18 Monate, unter dem hknn-sma Modell 19 Monate und 9 Monate unter den Beobachtungen. Hierbei ergibt sich ein maximales Defizitvolumen  $V_{DEF}$  von 0,9 hm<sup>3</sup> unter dem hknn Modell, nach dem Einsatz des SMA-Filters steigt dieses auf 1,0 hm<sup>3</sup>. Für die Beobachtung ergibt sich ein  $V_{DEF}$  von 0,5 hm<sup>3</sup>. Die maximale Länge der Überschussperioden  $L_{SUR}$  ist in den Beobachtungen 10 Monate und für beide Modelle 23 Monate bei einem maximalen Überschussvolumen von 2,9 hm<sup>3</sup> unter dem hknn Modell und 2,7 hm<sup>3</sup> unter dem hknn-sma Modell.



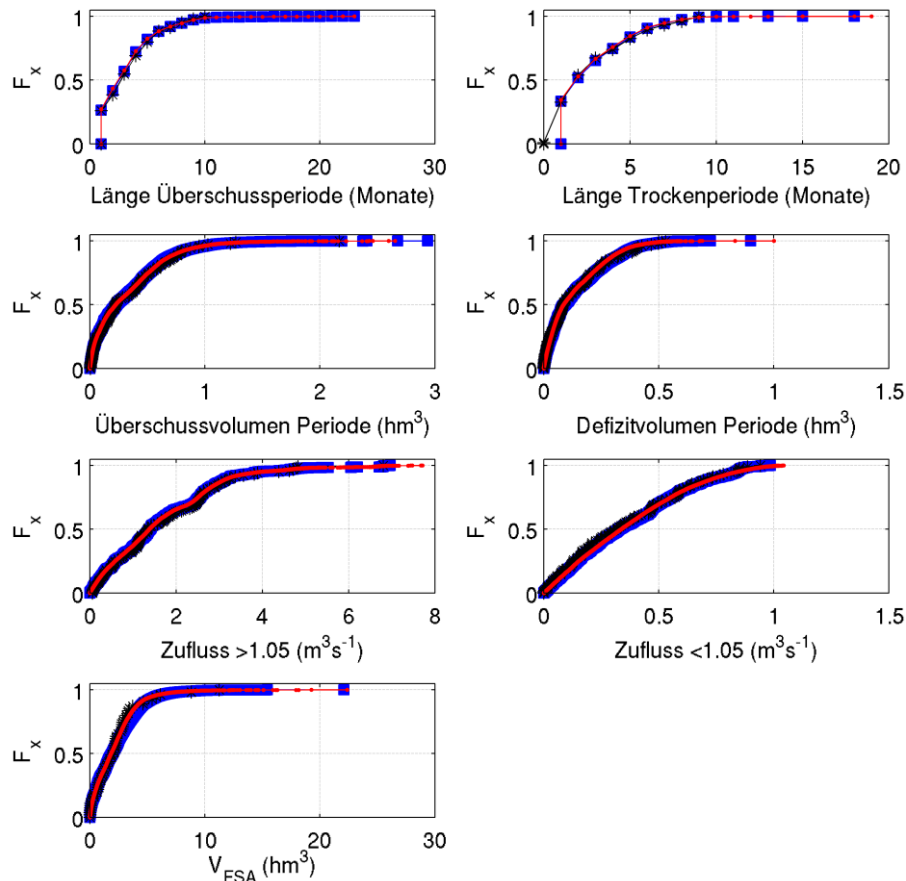


Abbildung 27: Empirische kumulative Verteilungsfunktionen  $F_x$  unterschiedlicher Parameter für Trockenperioden und Überschussperioden (Reanalysezeitraum 1961-1990, CLM). Als Schwellenwert ist  $1,05 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  angesetzt, der Zufluss ist die Summe der lokalen Zuflüsse A und B. Schwarz dargestellt sind die beobachteten Zuflüsse, blau die Zuflüsse des hknn Modells und rot die Zuflüsse des hknn-sma Modells.

### 3.2 Zeitreihengenerierung für projizierte klimatische Bedingungen

#### WETTREG2010

Die für eine vollständige Versorgungssicherheit benötigte Speichergröße, die von der extremsten Trockenperiode mit dem höchsten Defizitvolumen  $V_{FSA}$  vorgegeben wird, schwankt in der Zeitscheibe 1991- 2020 unter WETTREG2010 nur geringfügig. Die  $V_{FSA}$  -Werte für das hknn-sma Modell liegen für das Emissionsszenario B1 bei  $19,4 \text{ hm}^3$ , für das Emissionsszenario A1B bei  $20,2 \text{ hm}^3$  und für das Emissionsszenario A2 bei von  $24,2 \text{ hm}^3$ . Dies ist auch plausibel, denn in diesem Zeitraum unterscheiden sich die IPCC Emissionsszenarien in klimatischer Hinsicht nur geringfügig und die Unterschiede sind der stochastischen Komponente der Zeitreihengenerierung zuzuschreiben.

Für die Zeitscheibe 2021-2050 zeigen sich dann deutliche Unterschiede zwischen den Emissionsszenarien für das hknn-sma Modell. Mit  $27,2 \text{ hm}^3$  unterscheidet sich  $\hat{V}_{FSA}$  unter dem Emissionsszenario B1 nicht sonderlich vom Reanalysezeitraum. Für A2 ergibt sich ein  $\hat{V}_{FSA}$  von  $108 \text{ hm}^3$  aus den generierten Zeitreihen und unter A1B erhöht sich  $\hat{V}_{FSA}$  auf  $378 \text{ hm}^3$ . Jedoch ist  $V_{FSA}$  gegenüber geringen Änderungen von  $c_{crit}$  im Bereich hoher Sollabgaben sehr sensitiv. Dies illustriert Abbildung 28 für A1B in der Zeitscheibe 2021-2050. Demnach erfolgt die Zunahme von  $\hat{V}_{FSA}$  mit steigendem  $c_{crit}$  exponentiell. Bei einer Reduktion von  $c_{crit}$  um  $0,05 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  sinkt  $\hat{V}_{FSA}$  bereits auf unter einem Drittel des Wertes, auf  $104 \text{ hm}^3$  ab.

Auf Grund der Reduktion der Zuflüsse um rund 50% in der Zeitscheibe 2071-2100 kann zur Ermittlung des Defizitvolumens nach dem Folgescheitelalgorithmus hier nicht mehr mit einer konstanten Abgabe  $c_{crit}$  von  $1,05 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  gerechnet werden. Für die letzte Zeitscheibe wird  $c_{crit}$  auf  $0,65 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  reduziert. Trotzdem ergeben sich, im Vergleich zum Reanalysezeitraum, für das hknn-sma Modell deutlich erhöhte  $\hat{V}_{FSA}$  Werte für A1B mit  $60,8 \text{ hm}^3$  und  $65,9 \text{ hm}^3$  für A2. Etwas geringer ist  $\hat{V}_{FSA}$  für B1 mit  $51,2 \text{ hm}^3$ . Eine Übersicht über die Statistiken der Überschuss- und Defizitperioden für die generierten Zeitreihen unter WETTREG2010 für die einzelnen Zeitscheiben geben Tabelle 5 und Tabelle 6.

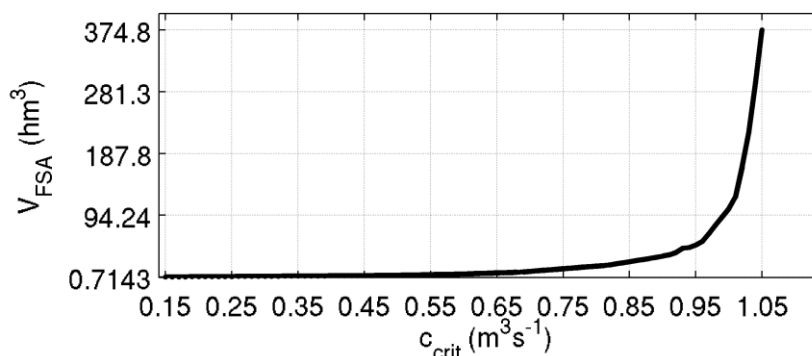


Abbildung 28: Exponentielle Zunahme des Defizitvolumens nach dem Folgescheitelalgorithmus für zunehmende Abgabeanforderungen  $c_{crit}$  für den Talsperrengesamtzufluss Klingenberg – Lehmühle für die Zeitscheibe 2021-2050 unter WETTREG2010, Emissionsszenario A1B.

### CLM

Die synthetischen Zeitreihen für das regionale Klimamodell CLM zeigen für die Zeitscheiben zum Jahr 2100 keine erkennbare Zunahme des maximalen Defizitvolumens  $\hat{V}_{FSA}$ . Die Defizitvolumen nach dem Folgescheitelalgorithmus schwanken durch die stochastische Natur des Zeitreihenmodells zwischen  $23,5 \text{ hm}^3$  und  $40,1 \text{ hm}^3$ , ein direkter Zusammenhang zwischen den projizierten Zuflüssen und den maximalen Defizitvolumen nach dem Folgescheitelalgorithmus besteht dabei nicht. Nach Übersichtstabelle 7 zeigen die weiteren Statistiken  $L_{DEF}$ ,  $L_{SUR}$ ,  $V_{DEF}$  und  $V_{SUR}$  keine feststellbare trendhafte Änderung mit der Zeit.

## 3.3 Übergreifende Untersuchungen

Mittels eines einfachen linearen Regressionsmodells soll der Zusammenhang zwischen den  $\hat{V}_{FSA}$  der simulierten und beobachteten Zeitreihen für jeweils sowohl für das hknn als auch das hknn-sma Modell überprüft werden. Der Datensatz einer Regression umfasst jeweils alle 19 einzelnen  $\hat{V}_{FSA}$  der beobachteten und unter dem entsprechenden Modell stochastisch generierten Zeitreihen.

Das lineare Modell mit Intercept ist für das hknn Modell  $\hat{V}_{FSA,gen} = -6,8 \text{ hm}^3 + 2,3 \times \hat{V}_{FSA,hknn}$  mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,96, für das hknn-sma Modell ist das lineare Modell mit Intercept  $\hat{V}_{FSA,gen} = -27,5 \text{ hm}^3 + 5,4 \times \hat{V}_{FSA,hknn}$  mit einem Bestimmtheitsmaß  $R^2$  von 0,93 (Abbildung 29). Hierbei ist  $\hat{V}_{FSA,gen}$  jeweils das maximale Defizitvolumen für den Folgescheitelalgorithmus unter dem entsprechenden Zeitreihenmodell. Ohne Intercept ergibt sich das lineare Regressionsmodell für das hknn Modell  $\hat{V}_{FSA,gen} = 2,0 \times \hat{V}_{FSA,hknn}$ , mit einem  $R^2$  von 0,88; und für das hknn-sma Modell  $\hat{V}_{FSA,gen} = 4,4 \times \hat{V}_{FSA,hknn}$ , mit einem  $R^2$  von 0,84. Somit verdoppelt sich das maximale Defizitvolumen  $\hat{V}_{FSA}$  im Schnitt durch die stochastische Zeitreihenverlängerung mit dem hknn Modell und vervierfacht sich mit dem hknn-sma Modell im Vergleich zu den Beobachtungsdaten.

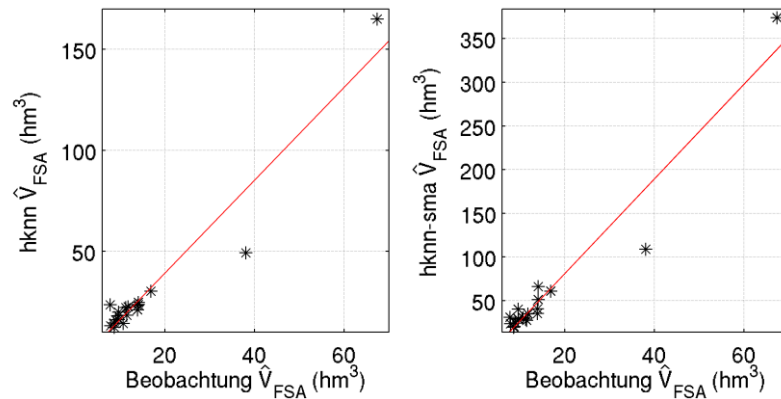


Abbildung 29: Zusammenhang zwischen des  $\hat{V}_{FSA}$  der beobachteten Zeitreihen und der mit den Zeitreihenmodellen hknn und hknn-sma generierten Zeitreihen. Die rote Linie gibt den geschätzten linearen Zusammenhang wieder.

Die in den (trendbereinigten) Realisationen der regionalen Klimamodelle WETTREG2010 und CLM vorzufindenden  $\hat{V}_{FSA}$  sind deutlich geringer als das maximale Defizitvolumen  $\hat{V}_{FSA}$  in den Beobachtungsdaten des Reanalysezeitraums 1961-1990, siehe Abbildung 30 (a) und (c). Unter WETTREG2010 beträgt das maximale  $\hat{V}_{FSA}$  in den 10 Realisierungen 10,7  $\text{hm}^3$ , das minimale  $\hat{V}_{FSA}$  liegt bei 5,4  $\text{hm}^3$  während der Median von  $\hat{V}_{FSA}$  bei 7,6  $\text{hm}^3$  liegt. Die beiden Realisationen von CLM erreichen jeweils  $\hat{V}_{FSA}$  von 8,7  $\text{hm}^3$  und 6,1  $\text{hm}^3$ . Im Vergleich liegt das  $\hat{V}_{FSA}$  der Beobachtungsdaten bei 13,9  $\text{hm}^3$ . Äquivalent hierzu sind die  $\hat{V}_{FSA}$  der zugehörigen generierten Zeitreihen mit gleicher Zeitreihenlänge für CLM etwas größer als für WETTREG2010.

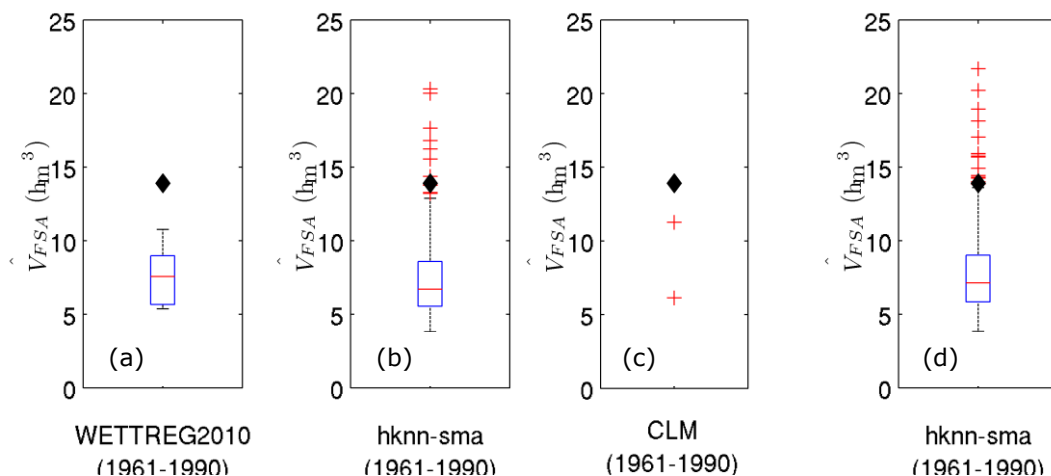


Abbildung 30: Übersicht der ermittelten  $\hat{V}_{FSA}$  in den Realisierungen (10 bzw. 2) der regionalen Klimamodelle WETTREG2010 (a) und CLM (c) im Reanalysezeitraum 1961-1990, sowie der stochastisch generierten Zeitreihen des selben Zeitraums (WETTREG2010 (b) und CLM (d)). Der schwarze Diamant in allen Abbildungen kennzeichnet das  $\hat{V}_{FSA}$  in den Beobachtungsdaten 1961-1990.

## 4. Zusammenfassung und Diskussion

Zur stochastischen Generierung multivariater Zuflusszeitreihen des Talsperrensystems Klingenberg-Lehnmühle-Rauschenbach wird das Zeitreihenmodell nach ASHRAFZADEH & RIZI (2009) mit dem SMA-Filter nach KOUTSOYIANNIS (2000) gekoppelt (hknn-sma Modell). Das neue Modell stellt somit eine Abwandlung des MPAR-SMA Modells von LANGOUSIS & KOUTSOYIANNIS (2006) dar, bei dem das multivariate periodische autoregressive model (MPAR) durch ein hybrides künstliches neuronales Netz ersetzt wird.

Durch den nachgeschalteten SMA-Filter kann die Autokorrelationsstruktur auf jährlicher Zeitskala auch für Lags größer als eins wiedergegeben werden, obwohl die Zeitreihengenerierung selbst auf monatlicher Zeitskala geschieht. Im Vergleich mit den beobachteten Zuflüssen im Gesamtzeitraum 1921-2007 und im Reanalysezeitraum 1961-1990 ist der jährliche Autokorrelationskoeffizient der beiden regionalen Klimamodelle bei einem Lag von eins in allen Zeiträumen und Szenarien deutlich geringer. Die entsprechenden Autokorrelogramme zeigen ebenso eine deutliche schwächere Autokorrelationsstruktur. Daher werden für das hknn-sma Modell bei der multivariaten Zeitreihengenerierung unter veränderten klimatischen Bedingungen die für die Beobachtungsdaten geschätzten Hurst-Koeffizienten verwendet. Damit ist die Ausprägung der Autokorrelationsstruktur auf jährlicher Zeitskala für das Zuflussregime unter den projizierten klimatischen Bedingungen mit jener der Beobachtung vergleichbar.

Für einen direkten Vergleich werden die generierten 10.000 jährigen Zeitreihen in die zu den Beobachtungsdaten jeweils äquivalenten Zeitreihenlängen unterteilt. Die wichtigsten statistischen Parameter (Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe, innerjährliche Autokorrelation auf monatlicher Zeitskala) können vom Zeitreihenmodell zuverlässig und frei von Bias wiedergegeben werden.

Auch die räumliche Korrelation der vier generierten multivariaten Zuflüsse bleibt in den synthetisch generierten Zeitreihen erhalten. Die marginalen monatlichen Dichteverteilungen der generierten lokalen Zuflüsse unterliegen einer hohen Variabilität, stimmen im mittleren Verhalten jedoch mit den Beobachtungswerten überein. Auch sehr schiefe und teilweise bimodale Verteilungen werden dank des K-Nearest Neighbor Resampling des hybriden Ansatzes generiert. Das hknn Modell bietet hier gegenüber klassischen parametrischen Modellen, wie dem MPAR Modell, Vorteile da hier zur Simulation von Innovationen keine parametrischen Verteilungsfunktionen angepasst werden müssen, die zumeist nicht in der Lage sind die beobachteten marginalen Dichteverteilungen befriedigend wiederzugeben. Wie weiterhin gezeigt wurde, ist das Zeitreihenmodell ebenso in der Lage neue, noch nicht beobachtete Zuflüsse zu generieren.

Das maximale Defizitvolumen nach dem Folgescheitelalgorithmus  $\hat{V}_{FSA}$  beschreibt das minimal erforderliche Volumen eines Versorgungsspeichers bei gegebener Sollabgabe innerhalb eines Zeitraums. Die mit dem hknn Modell, bei einer konstanten Abgabe von  $1,05 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , erreichten  $\hat{V}_{FSA}$  reichen bis zur Zeitscheibe 2021-2050 von  $19,4 \text{ hm}^3$  bis  $374 \text{ hm}^3$ . Ein deutlicher Anstieg von  $\hat{V}_{FSA}$  ist dabei erst in der Zeitscheibe 2021-2050 für die Emissionsszenarien A1B und A2 und dem regionalen Klimamodell WETTREG2010 zu zu verzeichnen. Der zur Verfügung stehende Stauinhalt der Talsperren Klingenberg und Lehmühle (ohne Rauschenbach) ist  $29,28 \text{ hm}^3$ . Die unter A1B erforderliche Staumenge entspricht demnach dem 12-fachen des zur Verfügung stehenden Volumens; unter A2 ist es das 3,5-fache Volumen. Das größte generierte  $\hat{V}_{FSA}$  im Reanalysezeitraum beträgt  $40,4 \text{ hm}^3$ . Im Vergleich hierzu steigt der erforderliche Speicher unter A1B um das 9-fache, bzw. um das 2,5-fache unter A2.

Ist die Sollabgabe jedoch im Vergleich zum mittleren Zufluss sehr hoch, reagiert  $\hat{V}_{FSA}$  äußerst sensitiv gegenüber kleinen Änderungen der geforderten Abgabe. Dies ist dem exponentiellen Wachstums von  $\hat{V}_{FSA}$  gegenüber  $c_{crit}$  geschuldet. Für die letzte Zeitscheibe 2071-2100 liegt der Mittelwert der akkumulierte Zufluss von A und B unter der historischen Abgabe von  $1,05 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Der Folgescheitelalgorithmus kann mit dieser Abgabe nicht mehr gelöst werden. Mit einer auf  $0,65 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  reduzierten Abgabe ist unter allen Emissionsszenarien gegenüber der Zeitreihengenerierung mit den Beobachtungsdaten im Reanalysezeitraum immer noch eine Erhöhung von  $\hat{V}_{FSA}$  um das anderthalbfache auf bis zu  $65,9 \text{ hm}^3$  zu verzeichnen. Gegenüber dem gegenwärtigen Stauvolumen in der Bewirtschaftungszone entspricht dies dem Faktor drei.

Die Dauer der längsten Trockenperioden  $L_{DEF}$ , sowie das maximale Defizitvolumen  $V_{DEF}$  nehmen unter WETTREG2010 bis 2021-2050 nicht zu. Für die Zeitscheibe 2071-2100 ist ein direkter Vergleich durch den veränderten Schwellenwert nicht möglich. Für die Statistiken der Überschussperioden sinkt die maximale Länge der Überschussperioden bis zum Ende des Projektionszeitraums 2100 von etwa 20 Monate auf ca. 10 Monate ab. Ebenso sinkt das maximale Überschussvolumen von etwa 3,2 hm<sup>3</sup> auf 1,8 hm<sup>3</sup> bis 2050 ab.

Das regionale Klimamodell CLM projiziert für den Teil des Osterzgebirges, in dem sich das Talsperrensystem Klingenberg-Lehnmühle-Rauschenbach befindet, keinen abnehmenden Niederschlag. Dementsprechend wird ebenso auch kein Rückgang der lokalen Zuflüsse durch das Wasserhaushaltsmodell WaSiM-ETH simuliert. Dies spiegelt sich natürlich wiederum in den generierten synthetischen Zeitreihen wieder. Auch hier sind in den Parametern zur Beschreibung des Trocken- und Überflussregimes keine Trends über die Zeitscheiben festzustellen. Die maximalen Defizitvolumen nach dem Folgescheitelalgorithmus  $\hat{V}_{FSA}$  schwanken für die 10.000 jährigen Zeitreihen zwischen minimalen 23,5 hm<sup>3</sup> und maximalen 40,1 hm<sup>3</sup>, mit einem Median aus allen sieben generierten Zeitreihen von 29,3 hm<sup>3</sup>. Die maximale Trockenperiodenlänge der generierten Zeitreihen  $L_{DEF}$  beträgt 20 Monate und ist etwas geringer als die beobachtete maximale Trockenperiodenlänge von 22 Monaten. Das größte maximale Defizitvolumen  $V_{DEF}$  ist mit 1,0 hm<sup>3</sup> ebenso etwas geringer als der beobachtete Wert von 1,13 hm<sup>3</sup>. Da die Berechnung der beiden Parameter jedoch nur auf dem lokalen Zufluss A beruht, muss bei der Betrachtung von  $L_{DEF}$  und  $V_{DEF}$  beachtet werden, dass dieser nach Tabelle 2 unterschätzt wird, da der lokale Zufluss B einen größeren prozentualen Anteil am Gesamtzufluss der Talsperren Klingenberg und Lehmühle besitzt. Der Vergleich der empirischen kumulativen Verteilungen der Parameter der Trocken- und Feuchtperioden zeigt weiterhin, dass das hknn Modell und das hknn-sma Modell in der Lage sind diese nachzubilden und im Extrembereich mit neuen unbeobachteten Werten zu erweitern.

Zur stochastischen Generierung der im Produkt 3.2.1d definierten Zuflusszeitreihen wurde das hknn-sma Modell entwickelt. Die Methodik des Zeitreihenmodells aus hybridem neuronalen Netzwerk und SMA-Filter wird eingesetzt um Zeitreihen multivariat auf monatlicher Basis zu generieren. Dabei werden die wichtigsten statistischen Parameter auf monatlicher und jährlicher Zeitskala zuverlässig bei allen durchgeführten Zeitreihengenerierungen bewahrt. Ebenso können die Kreuzkorrelationen mehrerer lokaler Zuflüsse untereinander, die monatlichen marginalen Verteilungsfunktionen der Zuflüsse, sowie die Verteilungen der Parameter der Trocken- und Überschussperioden gut wiedergegeben werden. Überjährliche Autokorrelationsstrukturen, die durch das hybride neuronale Netz nicht abgebildet werden können, werden erfolgreich durch den SMA-Filter im Postprocessing angepasst. Dies ist bei der Bemessung und Optimierung der Steuerung von wasserwirtschaftlichen Speichern eine wesentliche Grundlage, da z.B. die charakteristische Verteilung der Trockenperioden sonst unterschätzt wird (LANGOUSIS & KOUTSOYIANNIS 2006). Die generierten Zeitreihen der einzelnen Zeitscheiben unter verschiedenen Emissionsszenarien zweier regionaler Klimamodelle stellen dabei das jeweilig mittlere hydrologische Verhalten, ohne klimatisch induzierten Trend der Zuflüsse, dar. Dies ist wichtig, um als Grundlage zur Optimierung der Talsperrenbewirtschaftung genutzt werden zu können.

In weiteren Studien sollte untersucht werden, ob die Methodik des hknn-sma Zeitreihenmodells ebenso erfolgreich zur stochastischen Generierung von Zeitreihen des Niederschlages, von Zuflüssen, etc., auf täglicher Zeitskala anwendbar ist. Der SMA-Filter sollte hierbei eine wichtige Rolle spielen, da die Skalierung über Zeitskalen auf täglicher Basis besonders ausgeprägt ist.

Tabelle 5: Übersicht über das maximale Defizitvolumen  $\hat{V}_{FSA}$  (hm<sup>3</sup>), die Trockenperiodenlänge  $L_{DEF}$  (Monate), das Trockenperiodendefizitvolumen  $V_{DEF}$  (hm<sup>3</sup>), die Überschussperiodenlänge  $L_{SUR}$  (Monate) sowie das Überschussperiodenvolumen  $V_{SUR}$  (hm<sup>3</sup>) für rezente klimatische Verhältnisse.

Szenario	Zeitraum	Parameter	Grundlage	hknn	hknn-sma
Rezente klimatische Bedingungen					
Beobachtung	1921-2007	$\hat{V}_{FSA}$	13,9	21	35,2
		$L_{DEF}$	22	22	22
		$V_{DEF}$	1,13	1,15	1,38
		$L_{SUR}$	12	22	30
		$V_{SUR}$	2,36	3,23	3,9
Beobachtung	1961-1990	$\hat{V}_{FSA}$	13,9	23,1	40,4
		$L_{DEF}$	22	28	30
		$V_{DEF}$	1,13	1,44	1,88
		$L_{SUR}$	11	33	30
		$V_{SUR}$	1,2	4,48	4,14
WETTREG2010 Reanalyse		$\hat{V}_{FSA}$	10,7	14,2	30,3
		$L_{DEF}$	21,0	17,0	17,0
		$V_{DEF}$	1,0	1,0	1,0
		$L_{SUR}$	20,0	21,0	21,0
		$V_{SUR}$	2,7	3,2	3,2



Tabelle 6 Übersicht über das maximale Defizitvolumen  $\hat{V}_{FSA}$  (hm<sup>3</sup>), die Trockenperiodenlänge  $L_{DEF}$  (Monate), das Trockenperiodendefizitvolumen  $V_{DEF}$  (hm<sup>3</sup>), die Überschussperiodenlänge  $L_{SUR}$  (Monate) sowie das Überschussperiodenvolumen  $V_{SUR}$  (hm<sup>3</sup>) unter dem regionalen Klimamodell WETTREG2010.

Szenario	Zeitraum	Parameter	Grundlage	hknn	hknn-sma
Reanalyse	1961-1990	$\hat{V}_{FSA}$	10,7	14,2	30,3
		$L_{DEF}$	10,0	21,0	17,0
		$V_{DEF}$	0,6	1,0	1,0
		$L_{SUR}$	21,0	20,0	21,0
		$V_{SUR}$	2,3	2,7	3,2
A1B	1991-2020	$\hat{V}_{FSA}$	8,7	12,3	20,2
		$L_{DEF}$	10	11	11
		$V_{DEF}$	0,5	0,6	0,6
		$L_{SUR}$	18	20	20
		$V_{SUR}$	1,7	2,2	2,2
A2	1991-2020	$\hat{V}_{FSA}$	9,0	16,0	24,2
		$L_{DEF}$	11	16	11
		$V_{DEF}$	0,5	0,7	0,6
		$L_{SUR}$	18	20	20
		$V_{SUR}$	1,7	3,0	2,1
B1	1991-2020	$\hat{V}_{FSA}$	8,6	14,5	19,4
		$L_{DEF}$	10	12	18
		$V_{DEF}$	0,6	0,6	1,0
		$L_{SUR}$	20	23	22
		$V_{SUR}$	1,8	2,5	3,1
A1B	2021-2050	$\hat{V}_{FSA}$	67,4	165,0	374,0
		$L_{DEF}$	12	22	22
		$V_{DEF}$	0,6	1,1	1,2
		$L_{SUR}$	9	11	11
		$V_{SUR}$	1,1	1,7	1,6
A2	2021-2050	$\hat{V}_{FSA}$	38,1	49,2	108,7
		$L_{DEF}$	19	21	22
		$V_{DEF}$	1,0	1,2	1,2
		$L_{SUR}$	9	11	11
		$V_{SUR}$	1,5	1,9	1,8
B1	2021-2050	$\hat{V}_{FSA}$	11,5	18,3	27,2
		$L_{DEF}$	11	13	13
		$V_{DEF}$	0,5	0,3	0,6
		$L_{SUR}$	10	20	19
		$V_{SUR}$	1,6	1,9	1,8
A1B	2071-2100	$\hat{V}_{FSA}$	16,9	30,2	60,8
		$L_{DEF}$	19	23	26
		$V_{DEF}$	0,7	0,8	1,0
		$L_{SUR}$	9	12	12
		$V_{SUR}$	1,0	1,7	1,7
A2	2071-2100	$\hat{V}_{FSA}$	14,1	24,7	65,9
		$L_{DEF}$	11	21	21
		$V_{DEF}$	0,4	0,7	0,7
		$L_{SUR}$	8	9	9
		$V_{SUR}$	1,1	1,5	1,5
B1	2071-2100	$\hat{V}_{FSA}$	14,1	23,6	51,2
		$L_{DEF}$	11	20	22
		$V_{DEF}$	0,4	0,7	0,7
		$L_{SUR}$	8	10	10
		$V_{SUR}$	1,1	1,4	1,4

Tabelle 7: Übersicht über das maximale Defizitvolumen  $\hat{V}_{FSA}$  (hm<sup>3</sup>), die Trockenperiodenlänge  $L_{DEF}$  (Monate), das Trockenperiodendefizitvolumen  $V_{DEF}$  (hm<sup>3</sup>), die Überschussperiodenlänge  $L_{SUR}$  (Monate) sowie das Überschussperiodenvolumen  $V_{SUR}$  (hm<sup>3</sup>) unter dem regionalen Klimamodell CLM.

Szenario	Zeitraum	Parameter	Grundlage	hknn	hknn-sma
Reanalyse	1961-1990	$\hat{V}_{FSA}$	11,3	22,1	28,7
		$L_{DEF}$	9	18	19
		$V_{DEF}$	0,5	0,9	1,0
		$L_{SUR}$	10	23	23
		$V_{SUR}$	2,2	2,9	2,7
A1B	1991-2020	$\hat{V}_{FSA}$	7,9	13,1	23,5
		$L_{DEF}$	11,0	11,0	11,0
		$V_{DEF}$	0,7	0,7	0,7
		$L_{SUR}$	16,0	21,0	22,0
		$V_{SUR}$	1,7	2,4	2,4
B1	1991-2020	$\hat{V}_{FSA}$	9,6	18,1	40,1
		$L_{DEF}$	10,0	11,0	20,0
		$V_{DEF}$	0,5	0,7	0,9
		$L_{SUR}$	16,0	21,0	22,0
		$V_{SUR}$	1,7	2,3	2,5
A1B	2021-2050	$\hat{V}_{FSA}$	7,8	23,5	30,9
		$L_{DEF}$	11,0	17,0	17,0
		$V_{DEF}$	0,6	0,8	0,9
		$L_{SUR}$	10,0	17,0	22,0
		$V_{SUR}$	1,3	1,7	2,6
B1	2021-2050	$\hat{V}_{FSA}$	9,6	16,1	29,3
		$L_{DEF}$	10,0	20,0	20,0
		$V_{DEF}$	0,5	1,0	0,9
		$L_{SUR}$	8,0	12,0	19,0
		$V_{SUR}$	1,0	1,7	1,7
A1B	2071-2100	$\hat{V}_{FSA}$	11,8	22,5	34,8
		$L_{DEF}$	9,0	12,0	20,0
		$V_{DEF}$	0,6	0,7	0,7
		$L_{SUR}$	9,0	12,0	20,0
		$V_{SUR}$	1,3	1,8	2,2
B1	2071-2100	$\hat{V}_{FSA}$	9,7	19,8	28,4
		$L_{DEF}$	10,0	11,0	11,0
		$V_{DEF}$	0,5	0,7	0,4
		$L_{SUR}$	11,0	12,0	23,0
		$V_{SUR}$	1,4	2,4	3,2

## Literatur

- Ahmed, J. & Sarma, A. Artificial neural network model for synthetic streamflow generation Water Resources Management, Springer Netherlands, 2007, 21, 1015-1029
- Anderson, P., T. Y. & Meerschaert, M. Fourier-PARMA Models and Their Application to River Flows. Journal of Hydrologic Engineering, 2007, 12(5), 462-472
- Ashrafzadeh, A. & Rizi, A. P. A Hybrid Neural Network Based Model for Synthetic Time Series Generation. International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering, 2009
- Box, G. & Jenkins, G. Time Series Analysis: Forecasting and Control Holden-Day, 1976
- Elek, P. & Márkus, L. A long range dependent model with nonlinear innovations for simulating daily river flows. Natural Hazards and Earth System Science, 2004, 4, 277-283
- Fiering M. B. M. Multivariate technique for synthetic hydrology. Journal of the Hydraulic Division ASCE, 1964, 90, 43-60
- Heidenreich, M.; Franke, J.; Goldberg, V.; Surke, M.; S. Hänsel, A. H.; Feske, N. & Foltyn, M., Bernhofer, C.; Matschullat, J. & Bobeth, A. (Eds.) Klimaprojektionen für die REGKLAM-Modellregion Dresden REGKLAM-Publikationsreihe, RHOMBOS-VERLAG, 2011
- Hurst, H. Long term storage capacities of reservoirs. Transactions of ASCE, 1951, 116, 776-808
- Hydrologics Inc. User manual for OASIS with OC [www.HydroLogics.net](http://www.HydroLogics.net), 2009
- IPCC Climate Change 2007 - Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Geneva (CH), 2007
- Kim, B. S.; Kim, H. S. & Seoh, B. H. Streamflow simulation and skewness preservation based on the bootstrapped stochastic models. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, Springer Berlin / Heidelberg, 2004, 18, 386-400
- Koutsoyiannis, D. A generalized mathematical framework for stochastic simulation and forecast of hydrologic time series. Water Resources Research, 2000, 36(6), 1519-1534
- Koutsoyiannis, D. Coupling stochastic models of different timescales. Water Resources Research, 2001, 37(2), 379-39
- Koutsoyiannis, D. The Hurst phenomenon and fractional Gaussian noise made easy. Hydrological Sciences Journal, 2002, 47(4), 573-595
- Koutsoyiannis, D. Climate change, the Hurst phenomenon, and hydrological statistics. Hydrological Sciences Journal, 2003, 48(1), 3-24
- Koutsoyiannis, D. Nonstationarity versus scaling in hydrology. Journal of Hydrology, 2006, 324, 239 - 254
- Lall, U. & Sharma, A. A Nearest Neighbor Bootstrap For Resampling Hydrologic Time Series. Water Resources Research, 1996, 32(3), 679-693
- Langousis, A. & Koutsoyiannis, D. A stochastic methodology for generation of seasonal time series reproducing overyear scaling behaviour. Journal of Hydrology, 2006, 322, 138-154
- Lee, T.; Salas, D. & Prairie, J. An enhanced nonparametric streamflow disaggregation model with genetic algorithm. Water Resources Research, 2010, 46, W08545

- Mackay, D. J. C. A Practical Bayesian Framework for Backpropagation Networks. *Neural Computation*, 1992, 4, 448-472
- Maniak, U. Hydrologie und Wasserwirtschaft, Eine Einführung für Ingenieure Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2005
- Montanari, A.; Longoni, M. & Rosso, R. A seasonal long-memory stochastic model for the simulation of daily river flows. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 1999, 24, 319 – 324
- Müller, R.; Prange, N.; Lennartz, F.; Schütze, N., REGKLAM Ergebnisbericht Produkt 3.2.1a, Wasserhaushalt für projizierte Klimaszenarien, 2013
- Müller, R.; Schütze, N. (2013): Improving the future performance and reliability multi-reservoir systems by multi-objective optimization, In: *Proceedings of Symposium H09, IAHS-IAPSO-IASPEI Assembly, Gothenburg, Sweden*
- Ndiritu, J. A variable-length block bootstrap method for multi-site synthetic streamflow generation. *Hydrological Sciences Journal*, 2011, 56, 362-379
- Ochoa-Rivera, J. C.; García-Bartual, R. & Andreu, J. Multivariate synthetic streamflow generation using a hybrid model based on artificial neural networks. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2002, 6 (4), 641-654
- Prairie, J. R.; Rajagopalan, B.; Fulp, T. J. & Zagana, E. A. Modified K-NN model for stochastic streamflow simulation. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2006, 11, 371-378
- Rajagopalan, B.; J. Salas & Lall, U. Sivakumar, B. & Berndtsson, R. (Eds.) Stochastic methods for modeling precipitation and streamflow. In *Advances in Data-Based Approaches for Hydrologic Modeling and Forecasting*, Word Sci., 2009
- Raman, H. & Sunilkumar, N. Multivariate modelling of water resources time series using artificial neural networks. *Hydrological Sciences Journal*, 1995, 40, 145-163
- Rasmussen, P. F.; Salas, J. D.; Fagherazzi, L.; Rassam, J.-C. & Bobée, B. Estimation and validation of contemporaneous PARMA models for streamflow simulation. *Water Resources Research*, 1996, 32(10), 3151-3160
- Roeckner, E. The atmospheric general circulation model ECHAM5: Part I: Model description, Report Nr. 349, Max Planck Institute for Meteorology, Hamburg, 2003.
- Roeckner, E. Climate projections for the 21th Century, Max Planck Institute for Meteorology, Hamburg, 2006.
- Salas, J.; Delleur, J.W.; Yevjevich; V. & Lane; W. Applied Modeling of Hydrologic Time Series. Water Resources Publications, 1980
- Schakke, J. C. & Valencia, R. D. Disaggregation processes in stochastic hydrology. *Water Resources Research*, Wiley Online Library, 1973, 9, 580-585
- Sharma, A. & O'Neill, R. A nonparametric approach for representing interannual dependence in monthly streamflow sequences *Water. Resources Research*, 2002, 38(7), 1-10
- Silva, A. & Portela, M. Disaggregation modelling of monthly streamflows using a new approach of the method of fragments. *Hydrological Sciences Journal*, 2012, 57, 942-955
- Sivakumar, B.; Wallender, W. W.; Puente, C. E. & Islam, M. N. Streamflow disaggregation: a nonlinear deterministic approach. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2004, 11, 383-392
- Srinivas, V. & Srinivasan, K. Hybrid matched-block bootstrap for stochastic simulation of multi-season streamflows. *Journal of Hydrology*, 2006, 329, 1 – 15
- Sudheer, K. P.; Srinivasan, K.; Neelakanthan, T. R. & Srinivas, V. V. A nonlinear data-driven model for synthetic generation of annual streamflows. *Hydrological Processes*, 2008, 22, Art. No. W04004

Vecchia, A. V. Periodic autoregressive-moving average (PARMA) modeling with applications to water resources. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 1985, 21, 721–730

## Anhang

### Zu Kapitel 1.1.1

Tabelle A 1: Signifikante Parameter der Regression zwischen dem Zwischengebietszufluss zwischen den Talsperren Klingenberg und Lehmühle (lokaler Zufluss B) und dem Gesamtzufluss des Talsperrensystems Klingenberg und Lehmühle (GES) für jeden Monat  $m$ . Hierbei ist  $\alpha_m$  der Intercept für den Monat  $m$ ,  $\beta_m$  und  $\beta_{m-1}$  sind die Regressionskoeffizienten für den aktuellen Monat  $m$ , bzw. den vorhergehenden Monat  $m - 1$ .

Monat $m$	$\alpha_m$	$\beta_m$	$\beta_{m-1}$
1 (Jan)	0	0.237	0
2	0	0.213	0
3	0	0.216	0
4	0	0.185	0
5	0	0.210	0
6	0	0.328	-0.046
7	0	0.119	0.037
8	0	0.23	0
9	0	0.186	0
10	0	0.188	0
11	0	0.22	0
12 (Dez)	0	0.262	0



Tabelle A 2: Signifikante Parameter der Regression zwischen den Zuflüssen des Pegels Rauschenbach3 (lokaler Zufluss D) und dem Gesamtzufluss des Talsperrensystems Klingenberg und Lehmühle (GES) sowie dem Gesamtzufluss der Talsperre Rauschenbach © für jeden Monat  $m$ . Hierbei ist  $\alpha_m$  der Intercept für den Monat  $m$ ,  $\beta_m$  und  $\beta_{m-1}$  sind die Regressionskoeffizienten für den aktuellen Monat  $m$ , bzw. den vorhergehenden Monat  $m - 1$ .

Monat	$\alpha_m$	$\beta_{0,m}$	$\beta_{1,m}$
1 (Jan)	-0.042	0.322	0
2	0	0.142	0.04
3	0	0.163	0.033
4	0	0.112	0.05
5	0	0.197	0.021
6	0	0.206	0.026
7	0	0.143	0.043
8	-0.041	0.318	0
9	-0.022	0.272	0
10	-0.009	0.176	0.017
11	-0.039	0.301	0
12 (Dez)	-0.018	0.158	0.046

Beobachtete Daten, Zeitscheibe 1961-1990

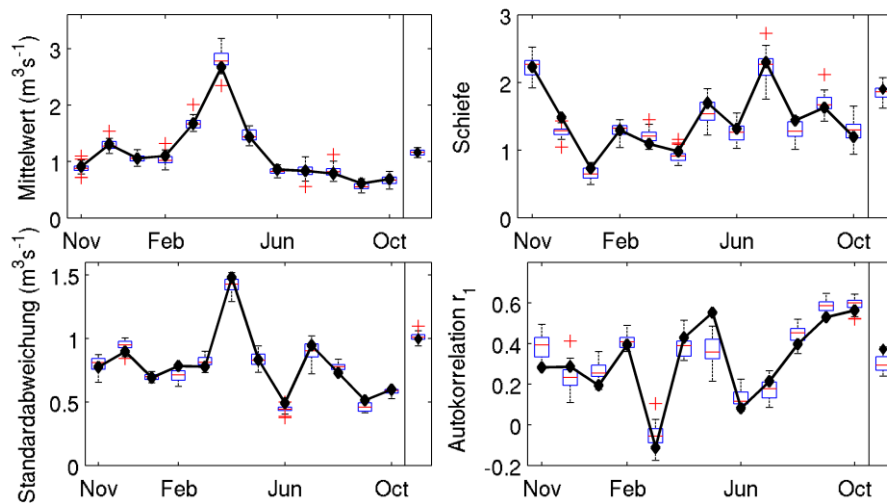


Abbildung A1: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte (Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe, Autokorrelationskoeffizient  $r_1$ ) für den lokalen Zufluss A für die Beobachtungsdaten 1961-1990. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hkn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

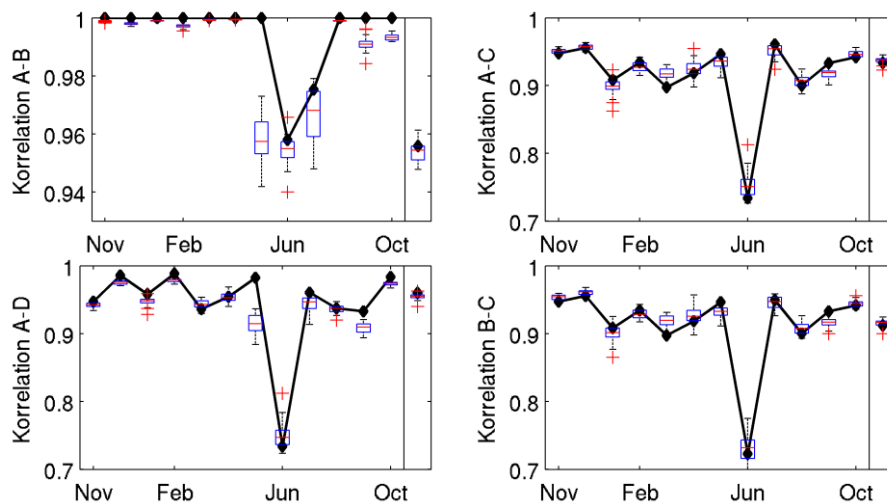


Abbildung A2: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte (Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe, Autokorrelationskoeffizient  $r_1$ ) für den lokalen Zufluss C für die Beobachtungsdaten 1961-1990. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hkn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

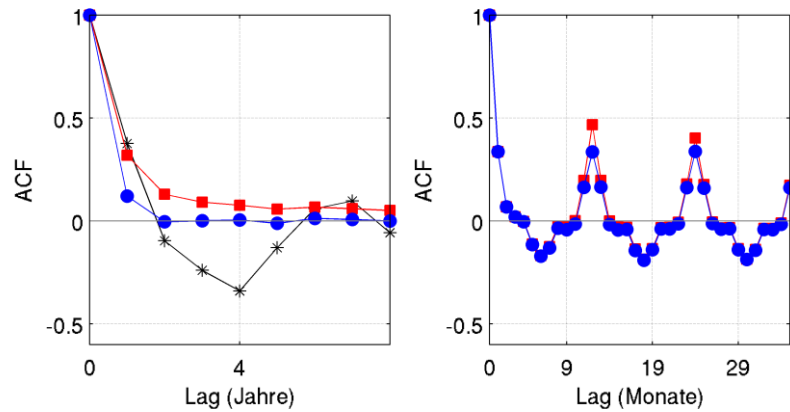


Abbildung A3: Autokorrelationsfunktionen für den rezenten klimatischen Zustand auf jährlicher Skala (links) und monatlicher Skala (rechts) für den lokalen Zufluss A (Datengrundlage 1961-1990). Beobachtete Zuflüsse sind in schwarz, simulierte Zuflüsse sind in rot (hknn-sma) und blau (hknn) dargestellt.

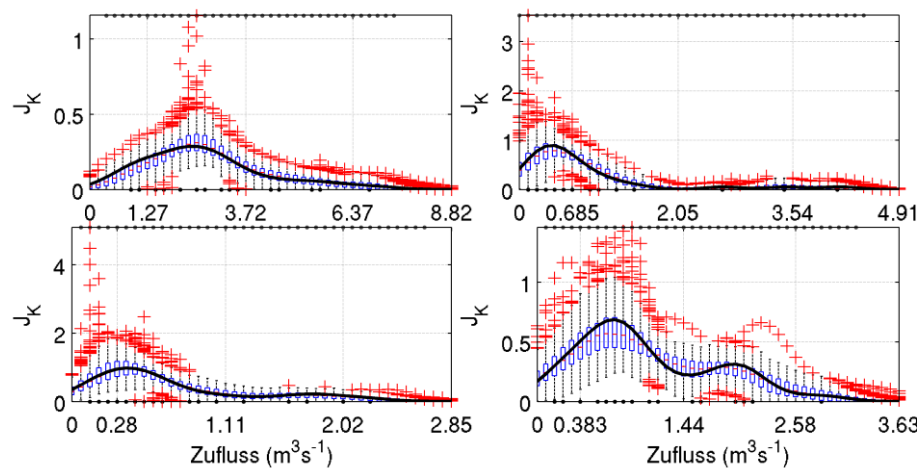


Abbildung A4: Marginale Dichtefunktionen  $J_K$  der Zuflüsse der Monate Januar (a), April (b), Juni (c) und Oktober (d) für den lokalen Zufluss A.  $J_K$  der beobachteten Zuflüsse ist als schwarze Linie dargestellt. Boxplots zeigen die marginalen Dichtefunktionen der simulierten Zuflüsse.

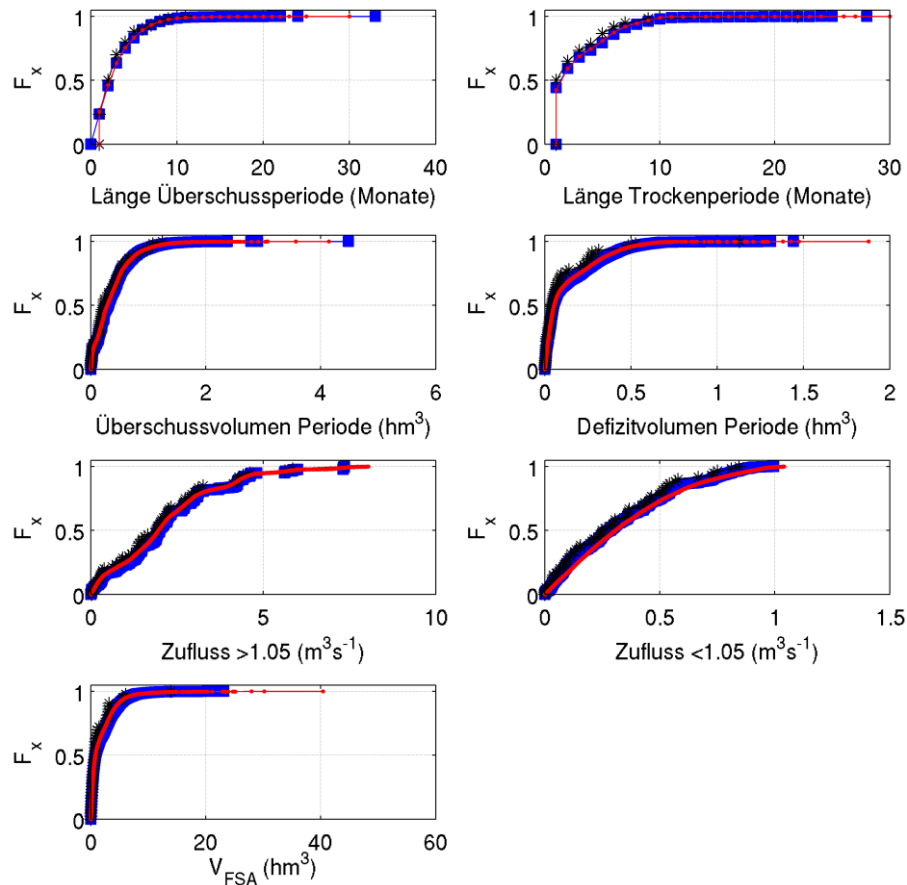


Abbildung A5: Empirische kumulative Verteilungsfunktionen  $F_x$  unterschiedlicher Parameter für Trockenperioden und Überschussperioden. Als Schwellenwert ist  $1,05 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  angesetzt, der Zufluss ist die Summe der Zuflüsse A und B. Schwarz dargestellt sind die beobachteten Zuflüsse, blau die Zuflüsse des hkn Modells und rot die Zuflüsse des hkn-sma Modells. Der betrachtete Zeitraum ist 1961-1990.

## Regionales Klimamodell WETTREG2010

### WETTREG2010, A1B, Zeitscheibe 1991-2020

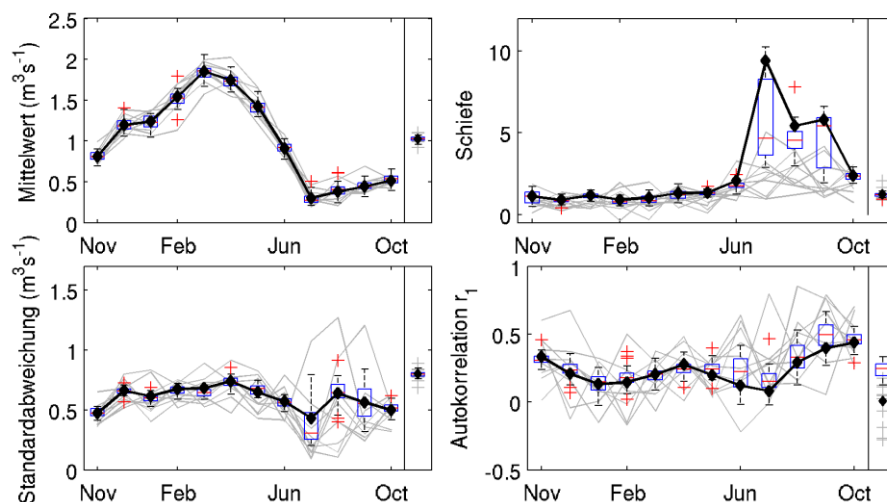


Abbildung A6: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte (Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe, Autokorrelationskoeffizient  $r_1$ ) für den lokalen Zufluss A für den Zeitraum 1991-2020, WETTREG2010, A1B. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hkn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

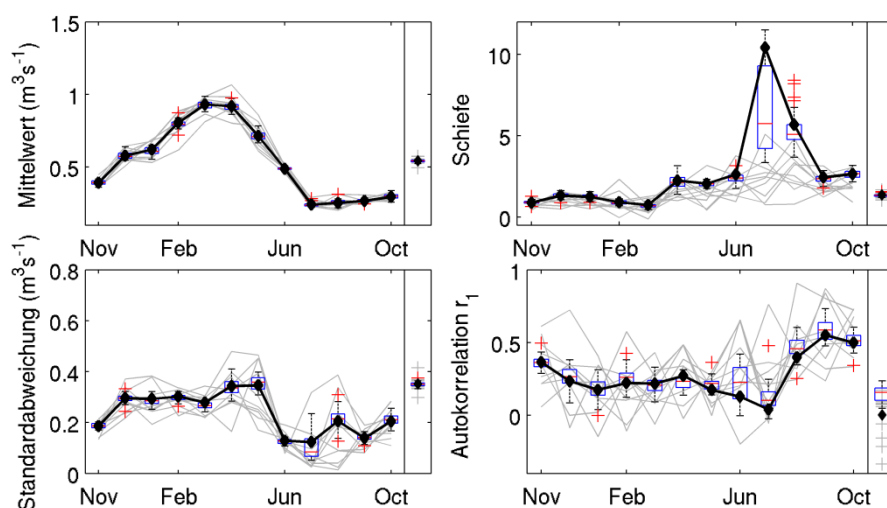


Abbildung A7: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte (Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe, Autokorrelationskoeffizient  $r_1$ ) für den lokalen Zufluss C für den Zeitraum 1991-2020, WETTREG2010, A1B. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hkn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

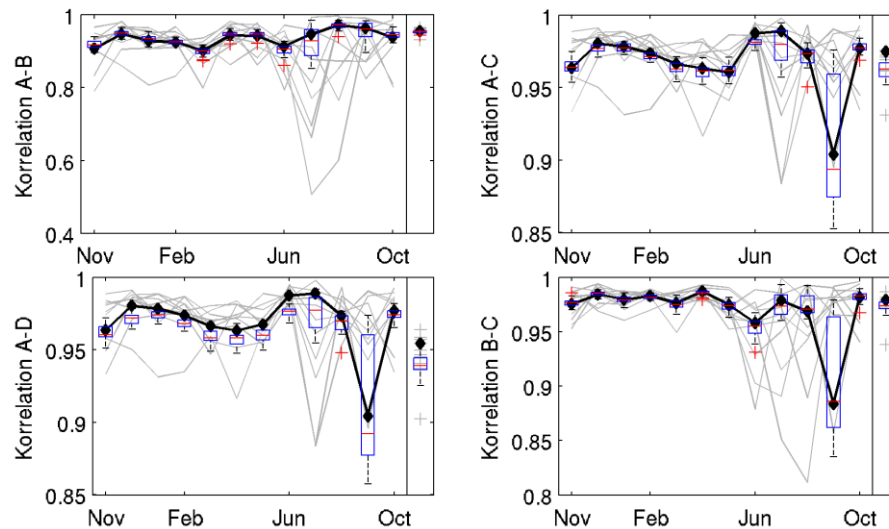


Abbildung A8: Vergleich ausgesuchter monatlicher und jährlicher Kreuzkorrelationen zwischen lokalen Zuflüssen des Zeitraums 1991-2020 für das regionale Klimamodell WETTREG2010, A1B. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hknn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

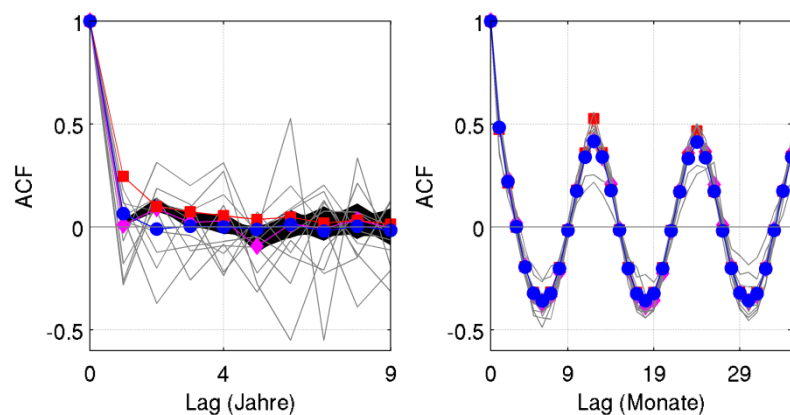


Abbildung A 9: Autokorrelogramm auf jährlicher Zeitskala (links) und monatlicher Zeitskala (rechts) für den Zeitraum 1991-2020, WETTREG2010. In grau sind die Autokorrelogramme der zehn einzelnen Realisationen dargestellt, in schwarz die Bandbreite aus den Rekombinationen des Gesamtdatensatzes. Weiterhin sind dargestellt: hknn-sma Modell (rot), hknn Modell (blau) und verwendeter Gesamtdatensatz (magenta).



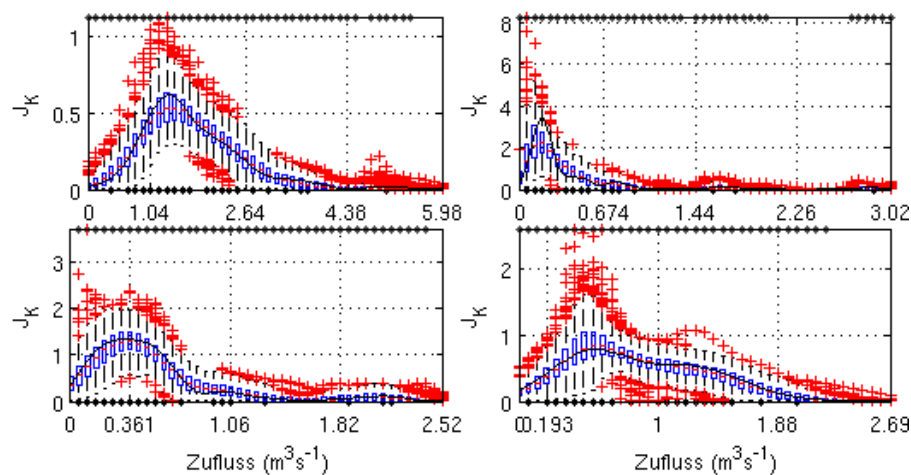


Abbildung A10: Marginale Dichtefunktionen  $J_K$  der Zuflüsse des Zeitraums 1991-2020, WETT-REG2010, A1B, in den Monaten Januar (oben links), April (oben rechts), Juni (unten links) und Oktober (unten rechts) für den lokalen Zufluss A.  $J_K$  der beobachteten Zuflüsse ist als schwarze Linie dargestellt. Boxplots zeigen die marginalen Dichtefunktionen der simulierten Zuflüsse.

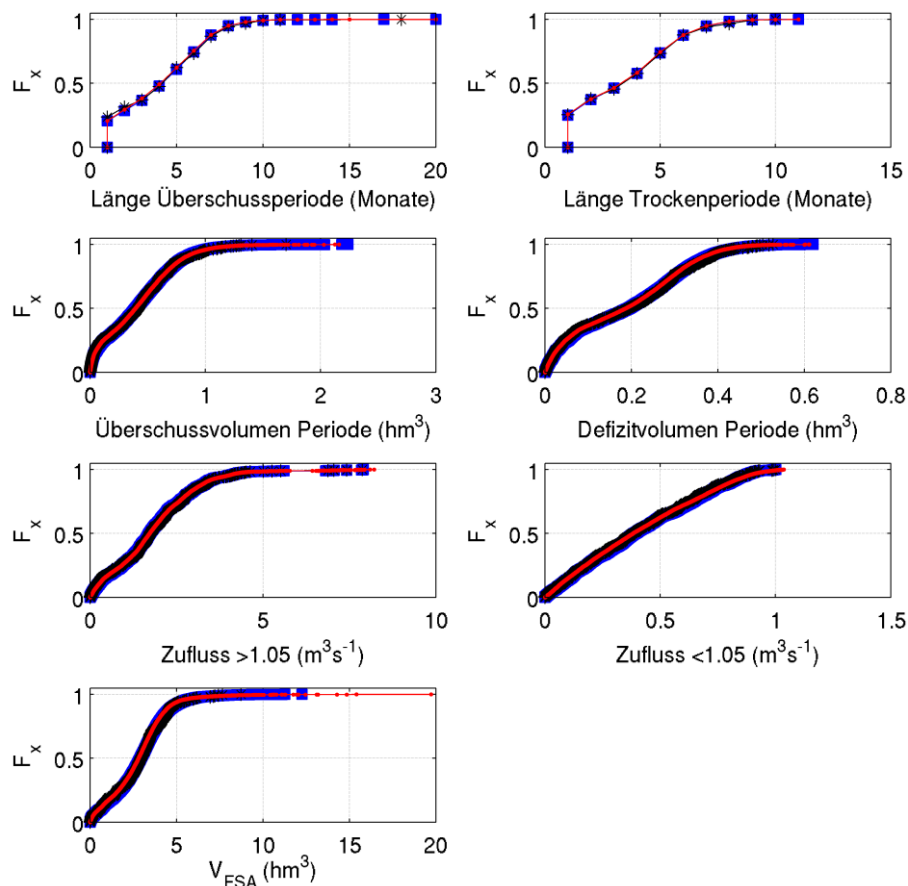


Abbildung A11: Empirische kumulative Verteilungsfunktionen  $F_x$  unterschiedlicher Parameter für Trockenperioden und Überschussperioden (Reanalysezeitraum 1991-2020, WETT-REG2010, A1B). Als Schwellenwert ist  $1,05 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  angesetzt, der Zufluss ist die Summe der lokalen Zuflüsse A und B. Schwarz dargestellt sind die beobachteten Zuflüsse, blau die Zuflüsse des hkn Modells und rot die Zuflüsse des hkn-sma Modells.

WETTREG2010, A1B, Zeitscheibe 2021-2050

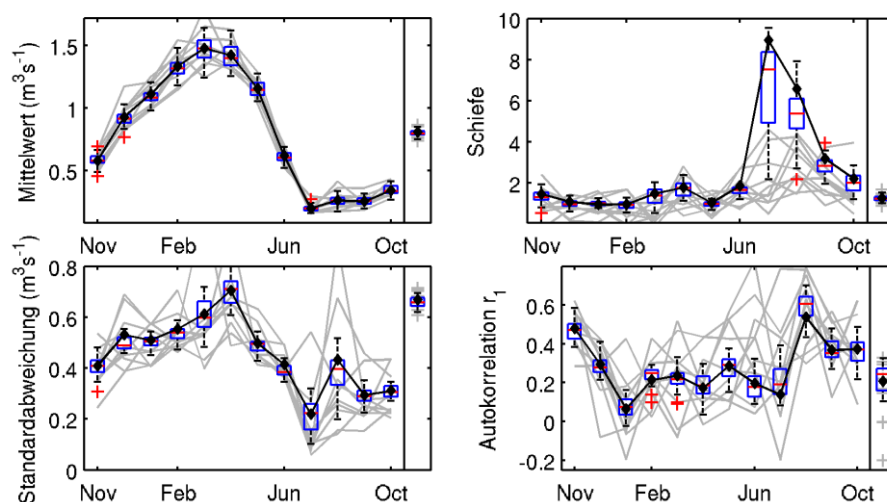


Abbildung A12: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte (Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe, Autokorrelationskoeffizient  $r_1$ ) für den lokalen Zufluss A für den

Zeitraum 2021-2050, WETTREG2010, A1B. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hkn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

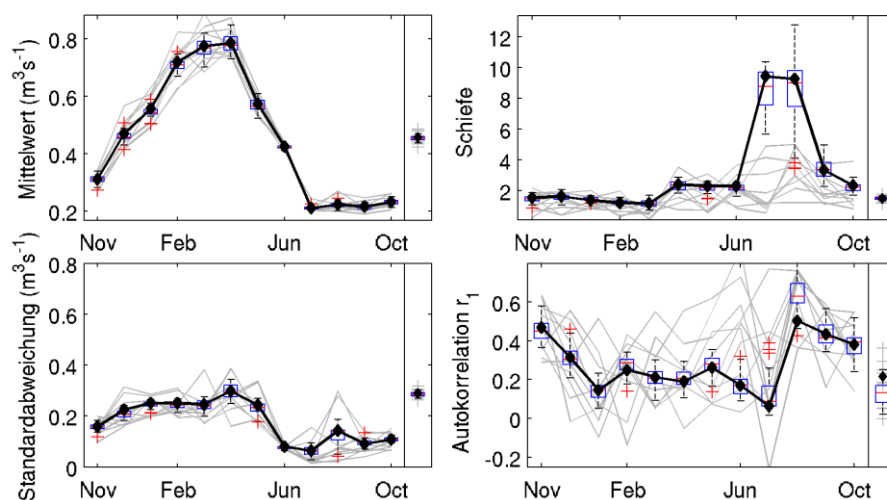


Abbildung A13: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte (Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe, Autokorrelationskoeffizient  $r_1$ ) für den lokalen Zufluss C für den

Zeitraum 2021-2050, WETTREG2010, A1B. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hkn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

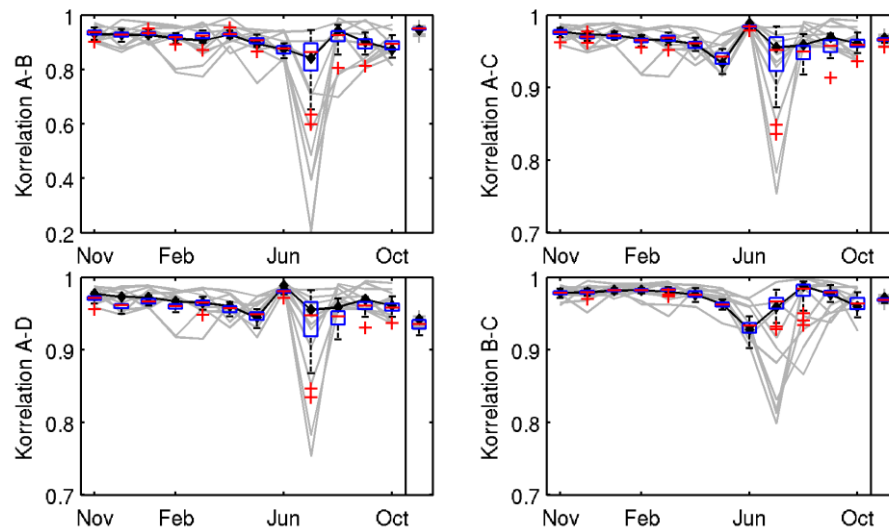


Abbildung A14: Vergleich ausgesuchter monatlicher und jährlicher Kreuzkorrelationen zwischen lokalen Zuflüssen des Zeitraums 2021-2050, A1B für das regionale Klimamodell WETTREG2010. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hknn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

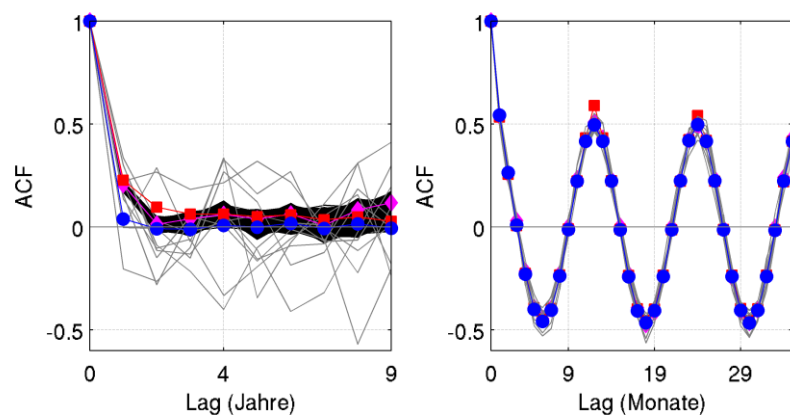


Abbildung A 15: Autokorrelogramm auf jährlicher Zeitskala (links) und monatlicher Zeitskala (rechts) für den Zeitraum 2021-2050, WETTREG2010, A1B. In grau sind die Autokorrelogramme der zehn einzelnen Realisationen dargestellt, in schwarz die Bandbreite aus den Rekombinationen des Gesamtdatensatzes. Weiterhin sind dargestellt: hknn-sma Modell (rot), hknn Modell (blau) und verwendeter Gesamtdatensatz (magenta).

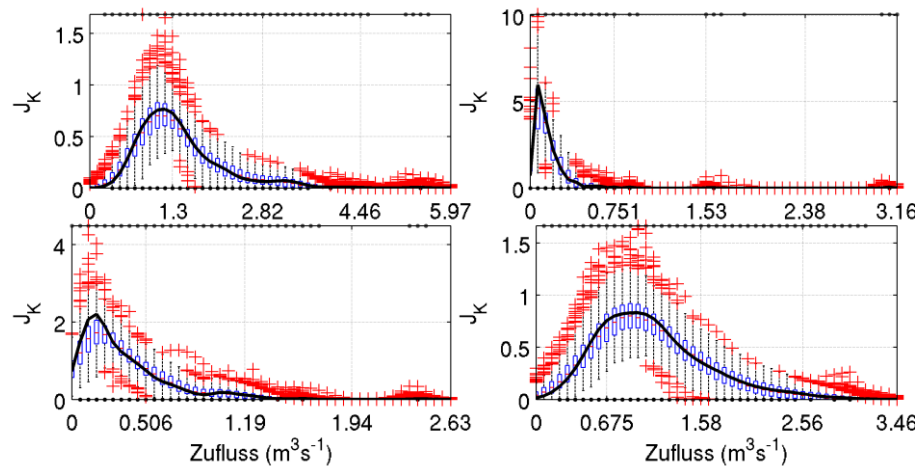


Abbildung A16: Marginale Dichtefunktionen  $J_K$  der Zuflüsse des Zeitraums 2021-2050, WETT-REG2010, A1B, in den Monaten Januar (oben links), April (oben rechts), Juni (unten links) und Oktober (unten rechts) für den lokalen Zufluss A.  $J_K$  der beobachteten Zuflüsse ist als schwarze Linie dargestellt. Boxplots zeigen die marginalen Dichtefunktionen der simulierten Zuflüsse.

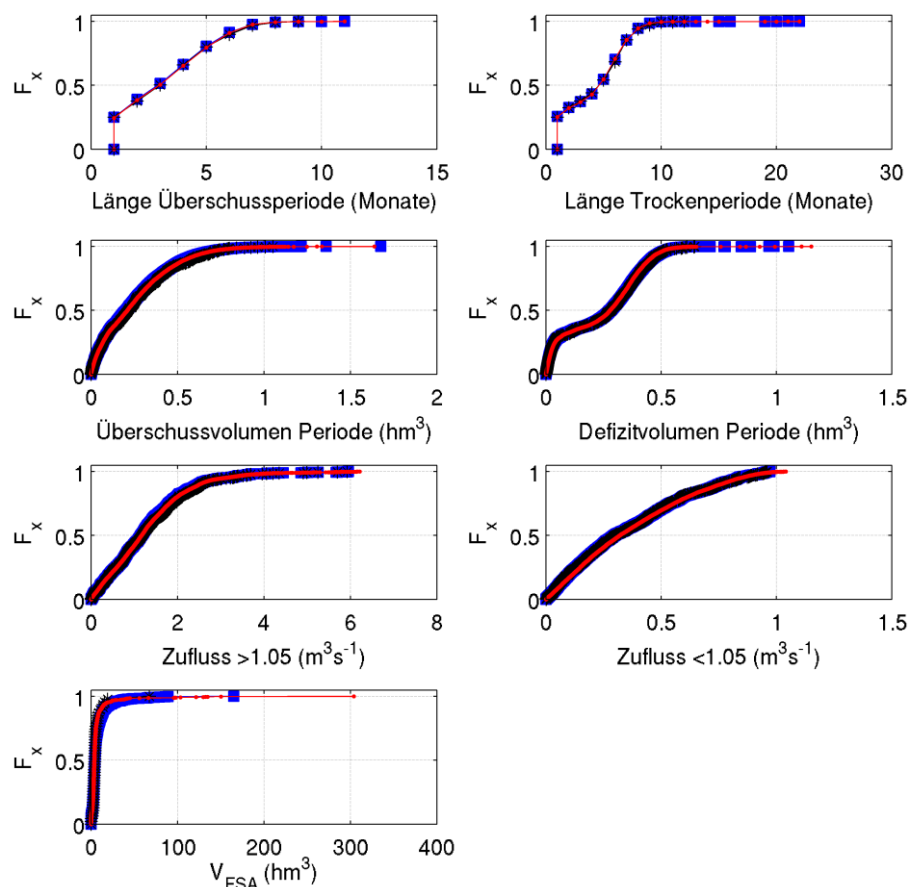


Abbildung A17: Empirische kumulative Verteilungsfunktionen  $F_x$  unterschiedlicher Parameter für Trockenperioden und Überschussperioden (Reanalysezeitraum 2021-2050, WETT-REG2010, A1B). Als Schwellenwert ist  $0,65 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  angesetzt, der Zufluss ist die Summe der lokalen Zuflüsse A und B. Schwarz dargestellt sind die beobachteten Zuflüsse, blau die Zuflüsse des hkn Modells und rot die Zuflüsse des hkn-sma Modells.

WETTREG2010, A1B, Zeitscheibe 2071-2100

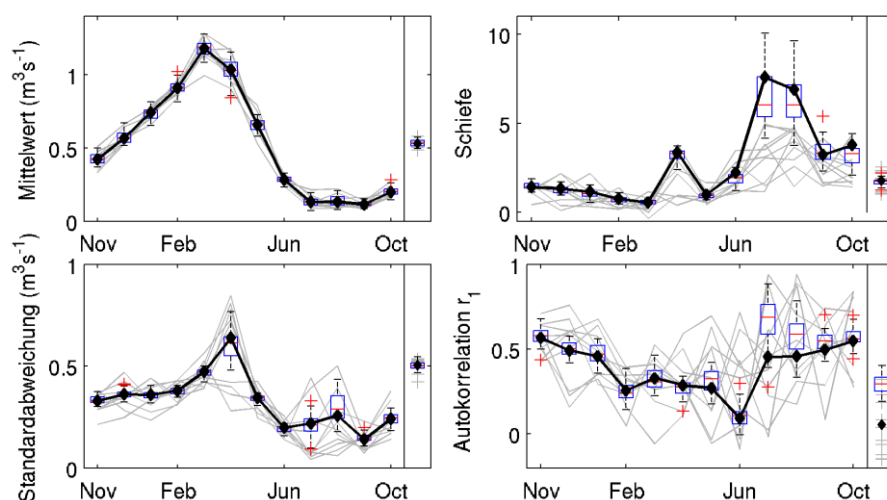


Abbildung A18: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte (Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe, Autokorrelationskoeffizient  $r_1$ ) für den lokalen Zufluss A für den Zeitraum 2071-2100, WETTREG2010, A1B. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hkn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

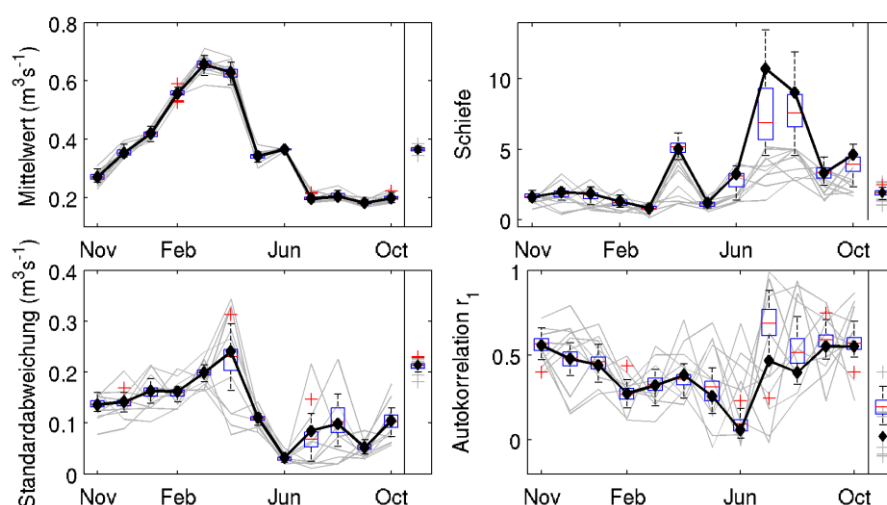


Abbildung A19: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte (Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe, Autokorrelationskoeffizient  $r_1$ ) für den lokalen Zufluss C für den Zeitraum 2071-2100, WETTREG2010, A1B. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hkn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

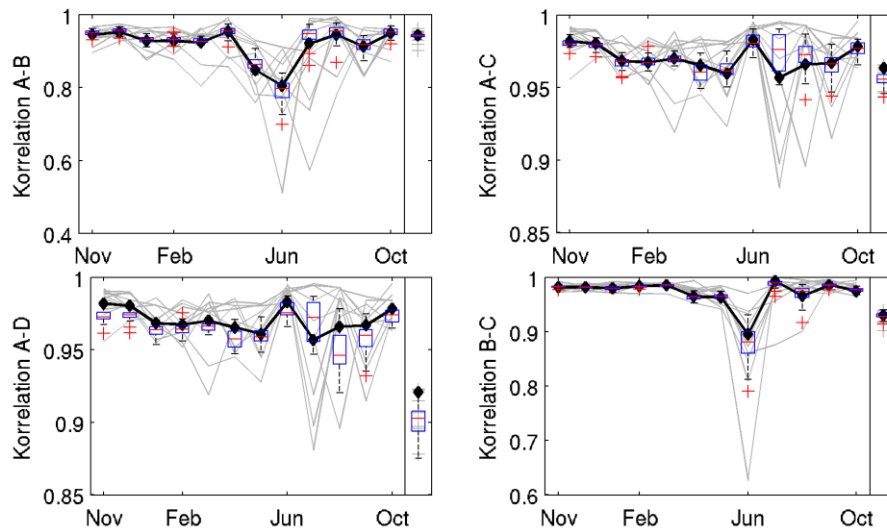


Abbildung A20: Vergleich ausgesuchter monatlicher und jährlicher Kreuzkorrelationen zwischen lokalen Zuflüssen des Zeitraums 2071-2100, A1B für das regionale Klimamodell WETTREG2010. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hknn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

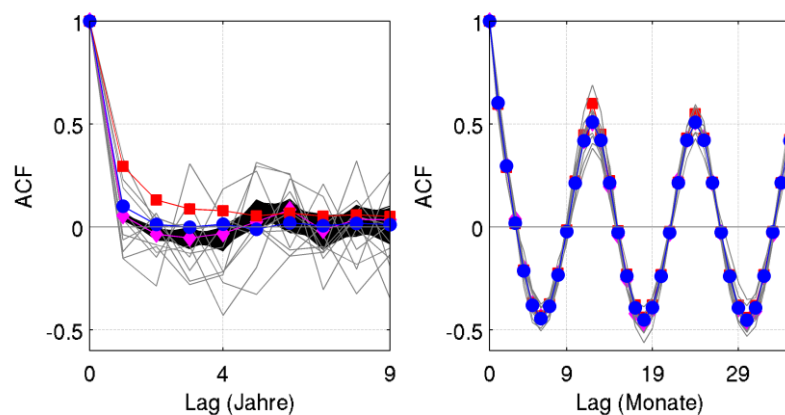


Abbildung A 21: Autokorrelogramm auf jährlicher Zeitskala (links) und monatlicher Zeitskala (rechts) für den Zeitraum 2071-2100, WETTREG2010, A1B. In grau sind die Autokorrelogramme der zehn einzelnen Realisationen dargestellt, in schwarz die Bandbreite aus den Rekombinationen des Gesamtdatensatzes. Weiterhin sind dargestellt: hknn-sma Modell (rot), hknn Modell (blau) und verwendeter Gesamtdatensatz (magenta).



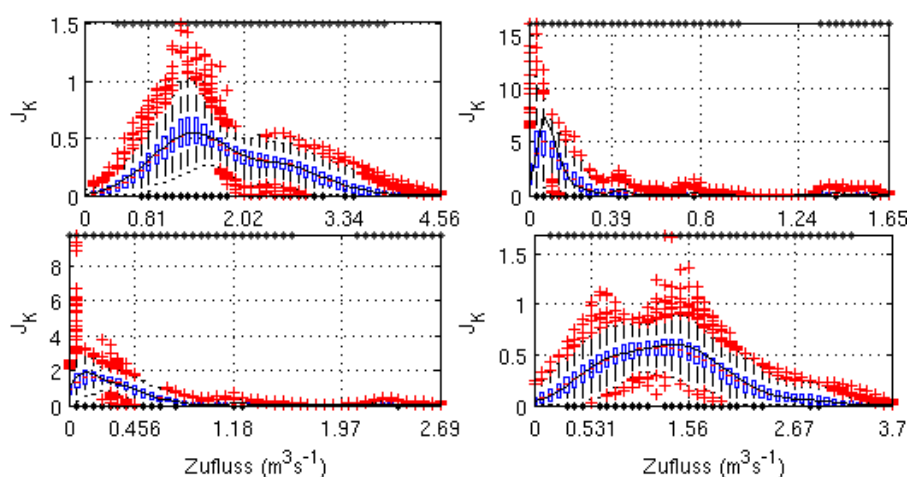


Abbildung A22: Marginale Dichtefunktionen  $J_K$  der Zuflüsse des Zeitraums 2071-2100, WETT-REG2010, A1B, in den Monaten Januar (oben links), April (oben rechts), Juni (unten links) und Oktober (unten rechts) für den lokalen Zufluss A.  $J_K$  der beobachteten Zuflüsse ist als schwarze Linie dargestellt. Boxplots zeigen die marginalen Dichtefunktionen der simulierten Zuflüsse.

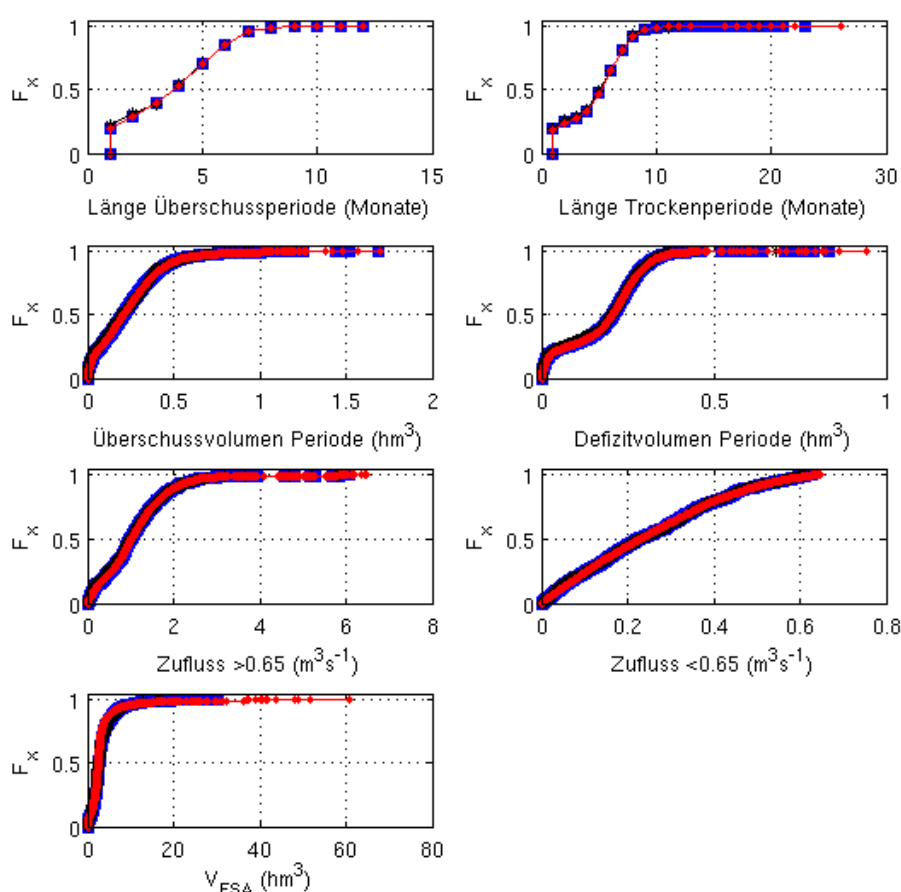


Abbildung A23: Empirische kumulative Verteilungsfunktionen  $F_x$  unterschiedlicher Parameter für Trockenperioden und Überschussperioden (Reanalysezeitraum 2071-2100, WETT-REG2010, A1B). Als Schwellenwert ist  $1.05 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  angesetzt, der Zufluss ist die Summe der lokalen Zuflüsse A und B. Schwarz dargestellt sind die beobachteten Zuflüsse, blau die Zuflüsse des hknn Modells und rot die Zuflüsse des hknn-sma Modells.

WETTREG2010, A2, Zeitscheibe 1991-2020

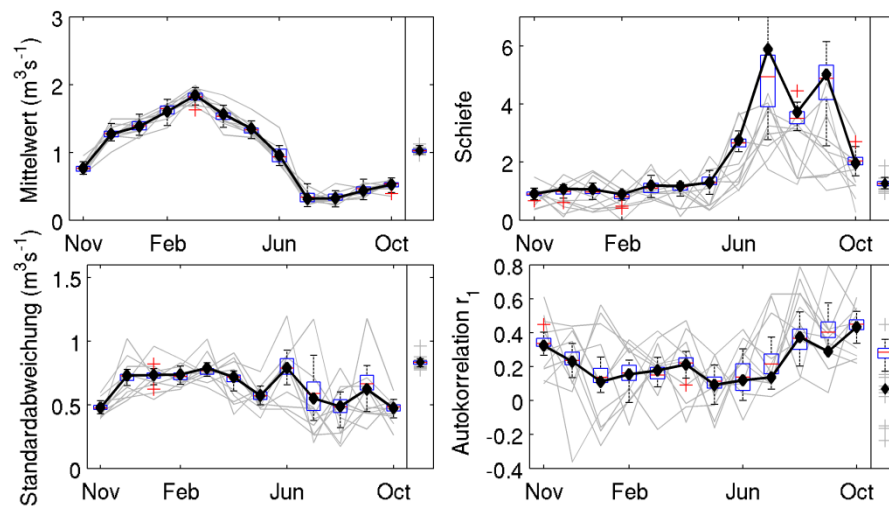


Abbildung A24: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte (Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe, Autokorrelationskoeffizient  $r_1$ ) für den lokalen Zufluss A für den Zeitraum 1991-2020, WETTREG2010, A2. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hkn-sm-a Modells sind als Boxplots dargestellt.

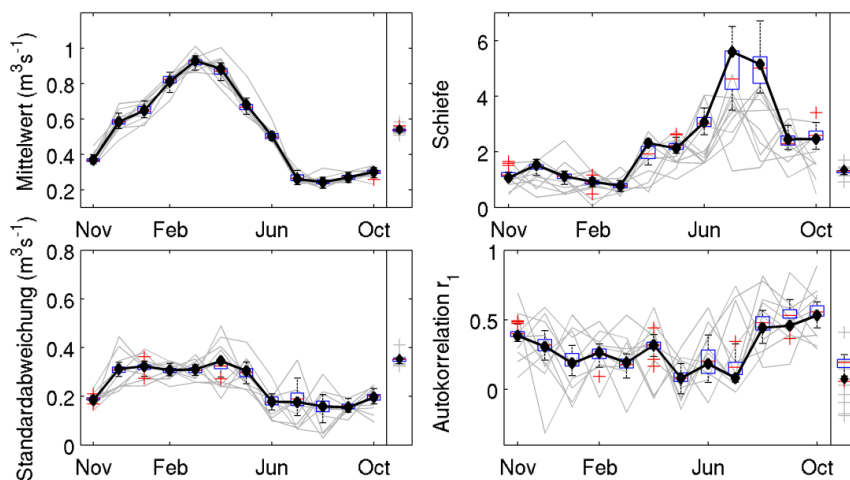


Abbildung A25: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte (Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe, Autokorrelationskoeffizient  $r_1$ ) für den lokalen Zufluss C für den Zeitraum 1991-2020, A2, WETTREG2010. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hkn-sm-a Modells sind als Boxplots dargestellt.

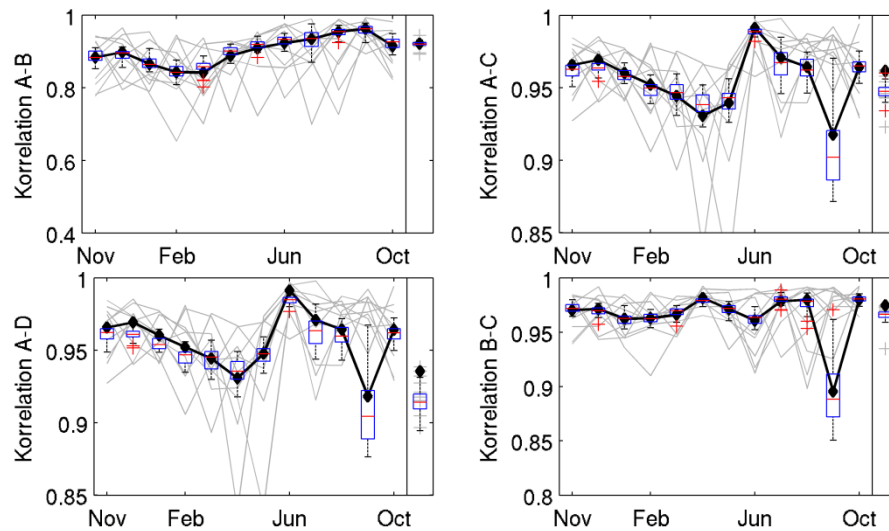


Abbildung A26: Vergleich ausgesuchter monatlicher und jährlicher Kreuzkorrelationen zwischen lokalen Zuflüssen des Zeitraums 1991-2020, A2 für das regionale Klimamodell WETTREG2010. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hknn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

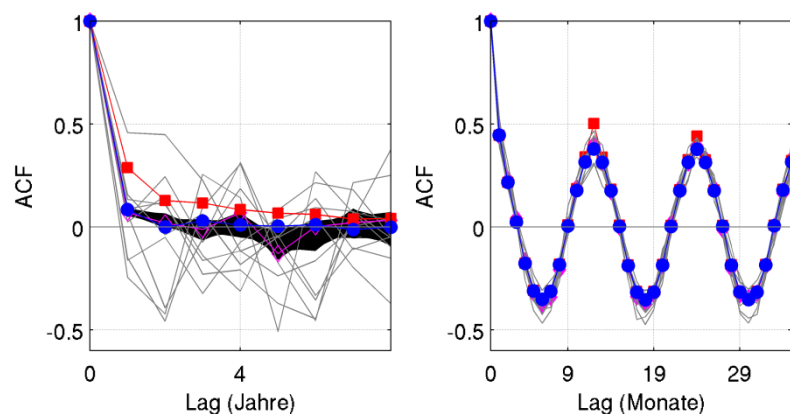


Abbildung A27: Autokorrelogramm auf jährlicher Zeitskala (links) und monatlicher Zeitskala (rechts) für den Zeitraum 1991-2020, WETTREG2010, A2. In grau sind die Autokorrelogramme der zehn einzelnen Realisationen dargestellt, in schwarz die Bandbreite aus den Rekombinationen des Gesamtdatensatzes. Weiterhin sind dargestellt: hknn-sma Modell (rot), hknn Modell (blau) und verwendeter Gesamtdatensatz (magenta).

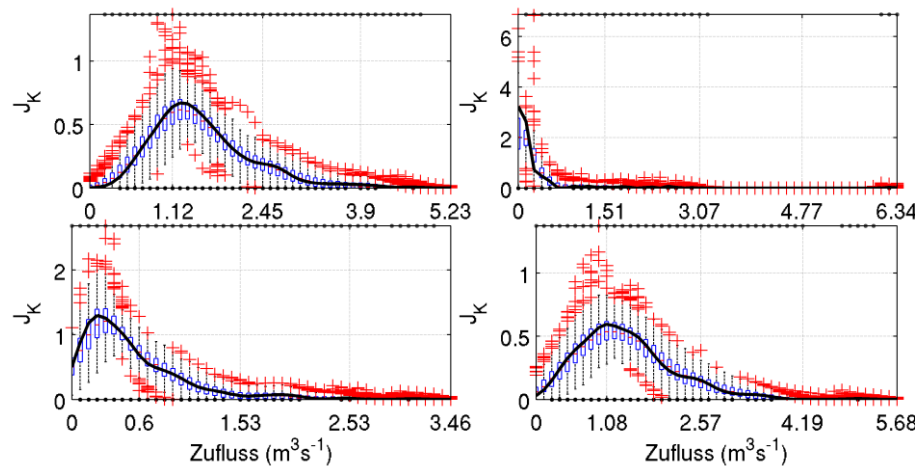


Abbildung A28: Marginale Dichtefunktionen  $J_K$  der Zuflüsse des Zeitraums 1991-2020, WETT-REG2010, A2, in den Monaten Januar (oben links), April (oben rechts), Juni (unten links) und Oktober (unten rechts) für den lokalen Zufluss A.  $J_K$  der beobachteten Zuflüsse ist als schwarze Linie dargestellt. Boxplots zeigen die marginalen Dichtefunktionen der simulierten Zuflüsse.

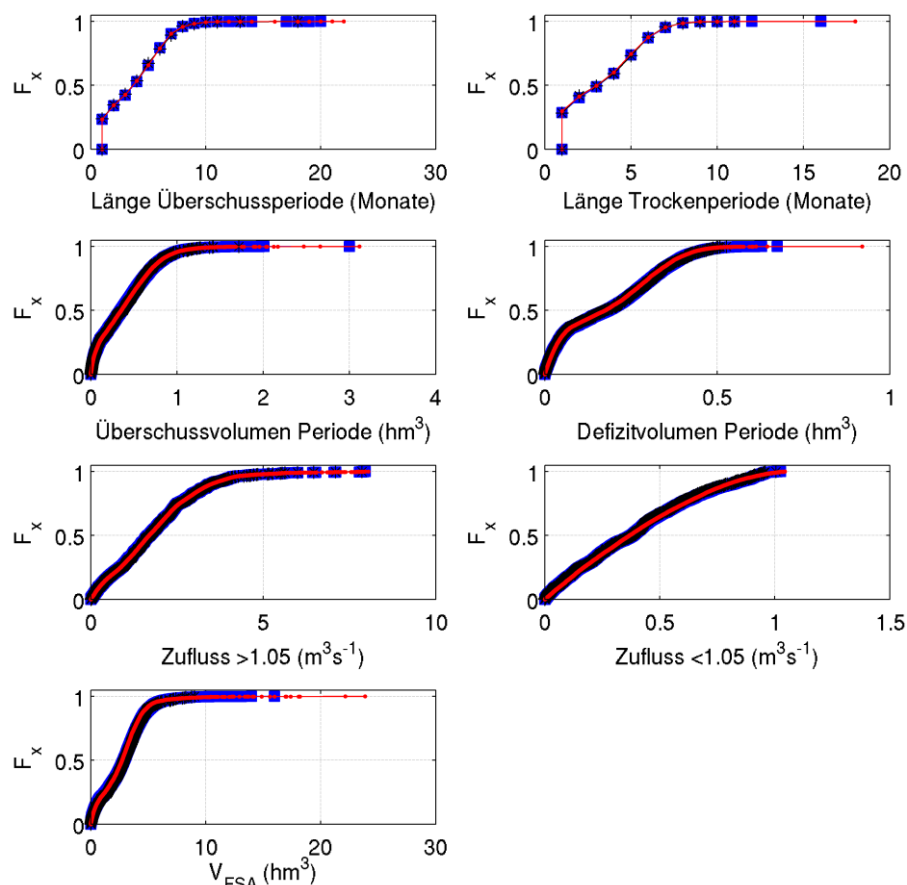


Abbildung A29: Empirische kumulative Verteilungsfunktionen  $F_x$  unterschiedlicher Parameter für Trockenperioden und Überschussperioden (Reanalysezeitraum 1961-1990, WETT-REG2010, A2). Als Schwellenwert ist  $1,05 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  angesetzt, der Zufluss ist die Summe der lokalen Zuflüsse A und B. Schwarz dargestellt sind die beobachteten Zuflüsse, blau die Zuflüsse des hkn Modells und rot die Zuflüsse des hkn-sma Modells.

WETTREG2010, A2, Zeitscheibe 2021-2050

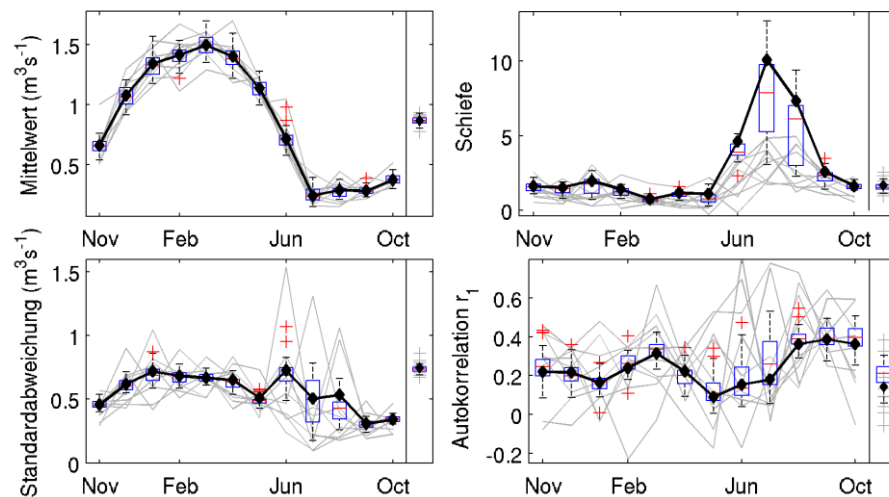


Abbildung A30: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte (Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe, Autokorrelationskoeffizient  $r_1$ ) für den lokalen Zufluss A für den Zeitraum 2021-2050, WETTREG2010, A2. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hkn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

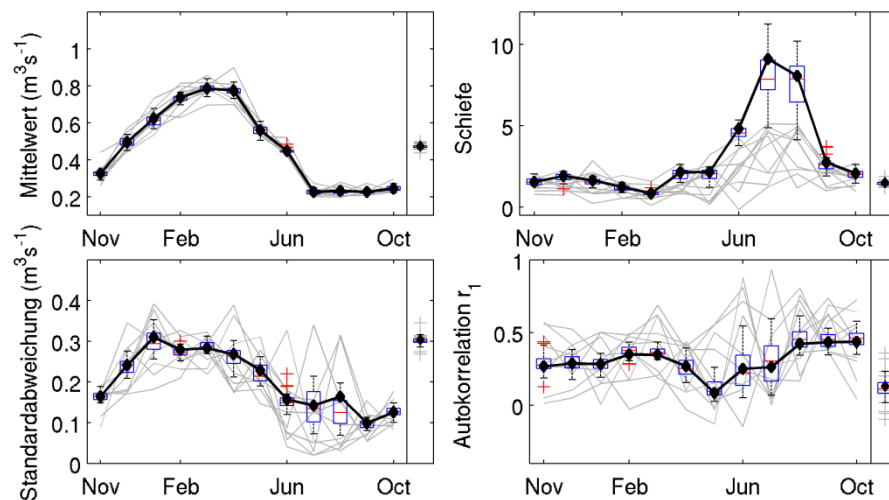


Abbildung A31: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte (Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe, Autokorrelationskoeffizient  $r_1$ ) für den lokalen Zufluss C für den Zeitraum 2021-2050, WETTREG2010, A2. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hkn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

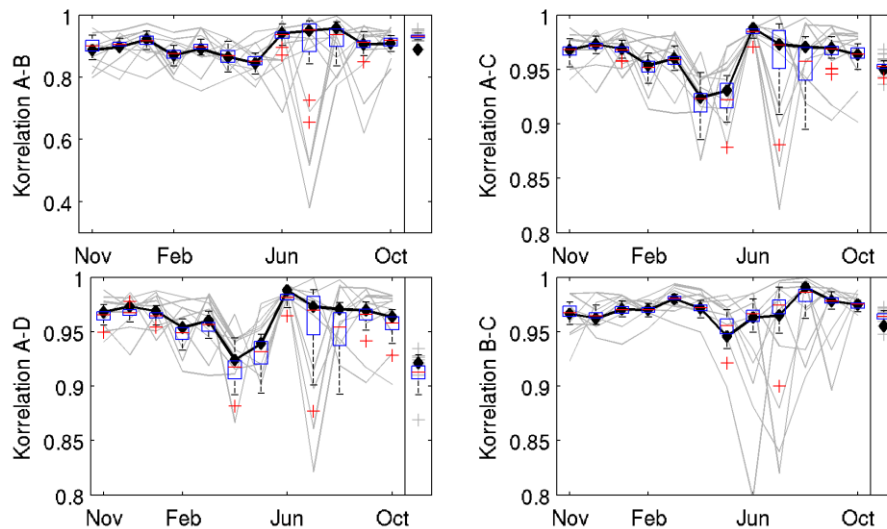


Abbildung A32: Vergleich ausgesuchter monatlicher und jährlicher Kreuzkorrelationen zwischen lokalen Zuflüssen des Zeitraums 2021-2050, A2 für das regionale Klimamodell WETTREG2010. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hknn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

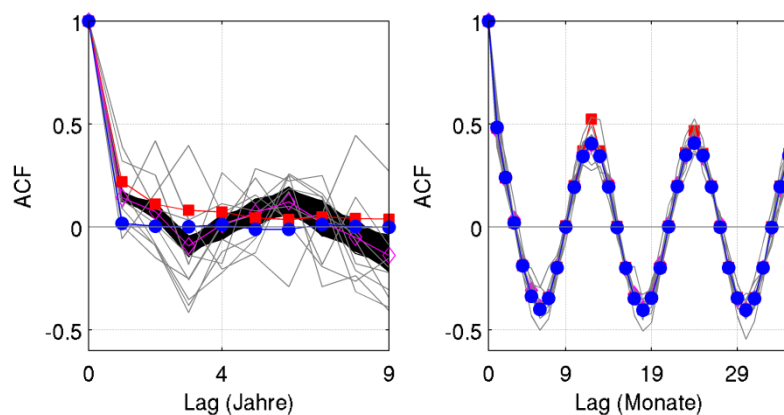


Abbildung A33: Autokorrelogramm auf jährlicher Zeitskala (links) und monatlicher Zeitskala (rechts) für den Zeitraum 2021-2050, WETTREG2010, A2. In grau sind die Autokorrelogramme der zehn einzelnen Realisationen dargestellt, in schwarz die Bandbreite aus den Rekombinationen des Gesamtdatensatzes. Weiterhin sind dargestellt: hknn-sma Modell (rot), hknn Modell (blau) und verwendeter Gesamtdatensatz (magenta).

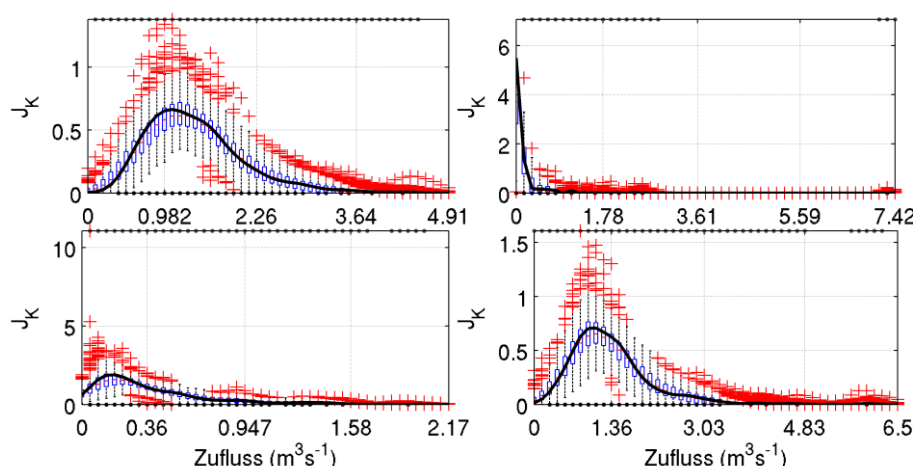


Abbildung A34: Marginale Dichtefunktionen  $J_K$  der Zuflüsse des Zeitraums 2021-2050, WETT-REG2010, A2, in den Monaten Januar (oben links), April (oben rechts), Juni (unten links) und Oktober (unten rechts) für den lokalen Zufluss A.  $J_K$  der beobachteten Zuflüsse ist als schwarze Linie dargestellt. Boxplots zeigen die marginalen Dichtefunktionen der simulierten Zuflüsse.

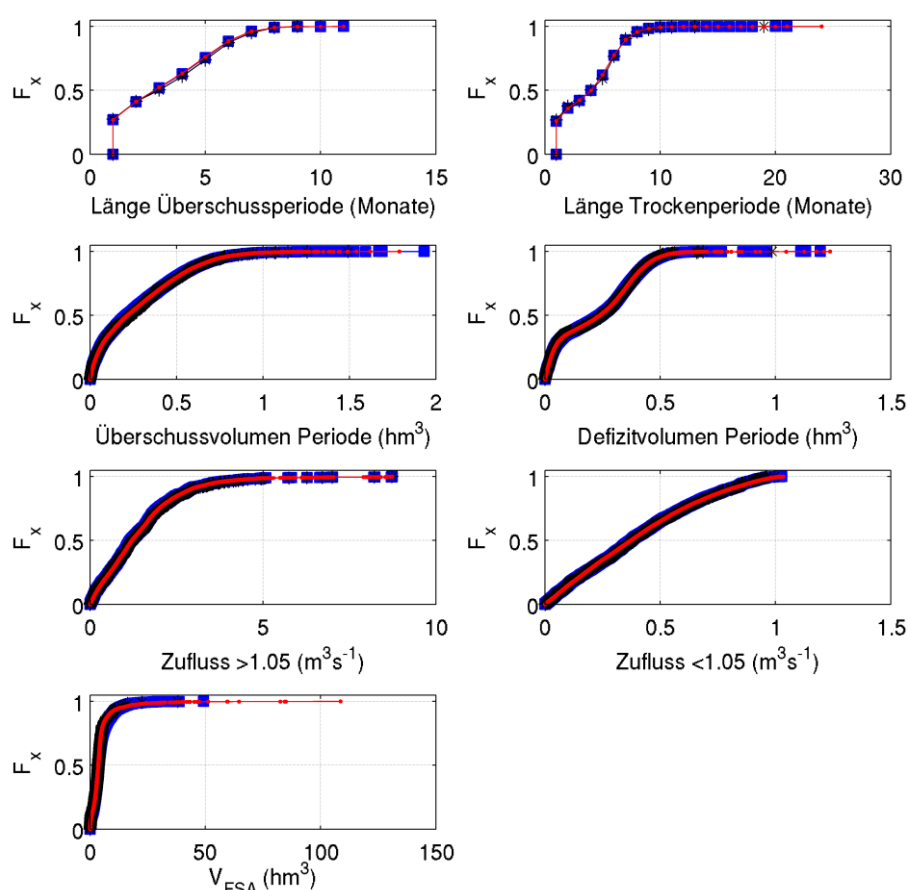


Abbildung A35: Empirische kumulative Verteilungsfunktionen  $F_x$  unterschiedlicher Parameter für Trockenperioden und Überschussperioden (Reanalysezeitraum 2021-2050, WETT-REG2010, A2). Als Schwellenwert ist  $1,05 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  angesetzt, der Zufluss ist die Summe der lokalen Zuflüsse A und B. Schwarz dargestellt sind die beobachteten Zuflüsse, blau die Zuflüsse des hkn Modells und rot die Zuflüsse des hkn-sma Modells.



WETTREG2010, A2, Zeitscheibe 2071-2100

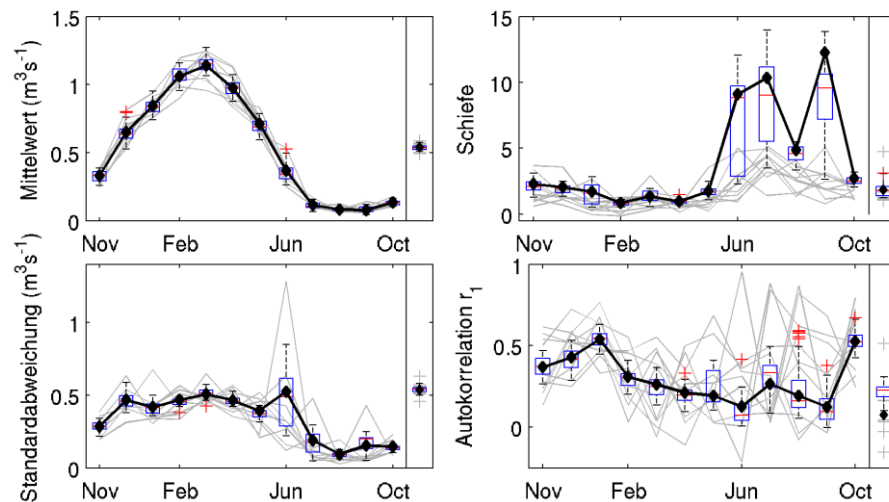


Abbildung A36: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte (Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe, Autokorrelationskoeffizient  $r_1$ ) für den lokalen Zufluss A für den Zeitraum 2071-2100, WETTREG2010, A2. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hkn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

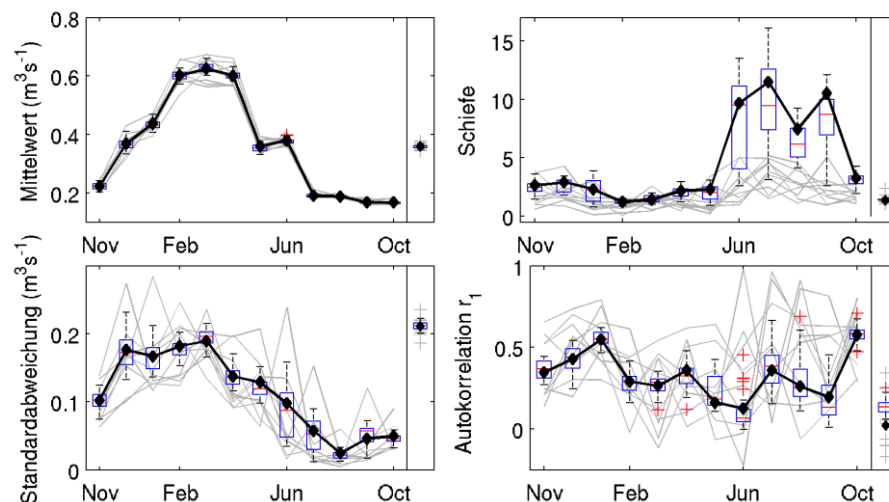


Abbildung A37: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte (Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe, Autokorrelationskoeffizient  $r_1$ ) für den lokalen Zufluss C für den Zeitraum 2071-2100, WETTREG2010, A2. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hkn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

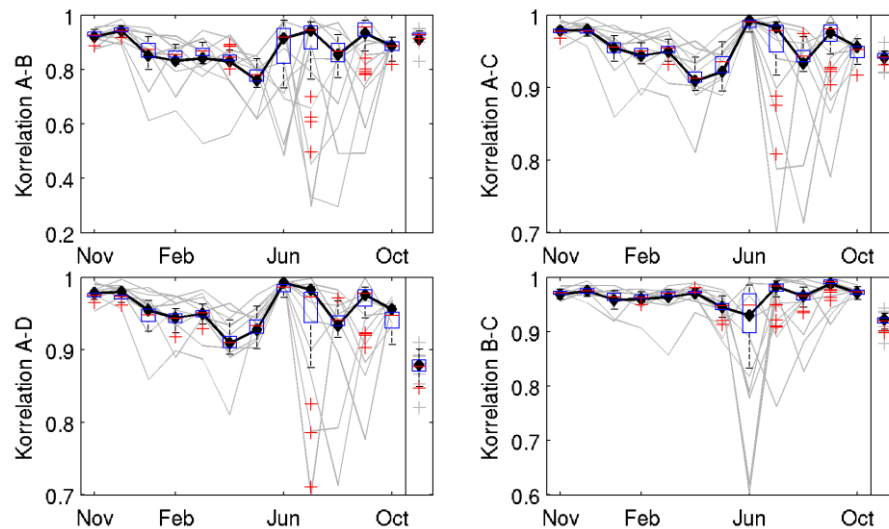


Abbildung A38: Vergleich ausgesuchter monatlicher und jährlicher Kreuzkorrelationen zwischen lokalen Zuflüssen des Zeitraums 2071-2100, A2 für das regionale Klimamodell WETTREG2010. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hknn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

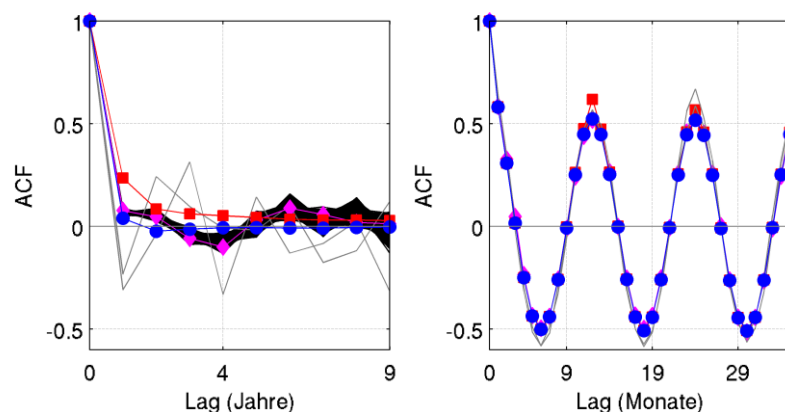


Abbildung A39: Autokorrelogramm auf jährlicher Zeitskala (links) und monatlicher Zeitskala (rechts) für den Zeitraum 2071-2100, WETTREG2010, A2. In grau sind die Autokorrelogramme der zehn einzelnen Realisationen dargestellt, in schwarz die Bandbreite aus den Rekombinationen des Gesamtdatensatzes. Weiterhin sind dargestellt: hknn-sma Modell (rot), hknn Modell (blau) und verwendeter Gesamtdatensatz (magenta).

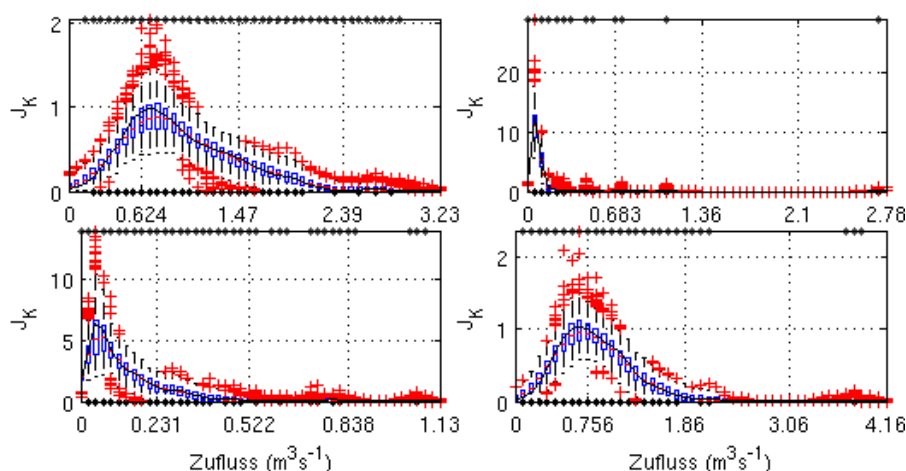


Abbildung A40: Marginale Dichtefunktionen  $J_K$  der Zuflüsse des Zeitraums 2071-2100, WETT-REG2010, A2, in den Monaten Januar (oben links), April (oben rechts), Juni (unten links) und Oktober (unten rechts) für den lokalen Zufluss A.  $J_K$  der beobachteten Zuflüsse ist als schwarze Linie dargestellt. Boxplots zeigen die marginalen Dichtefunktionen der simulierten Zuflüsse.

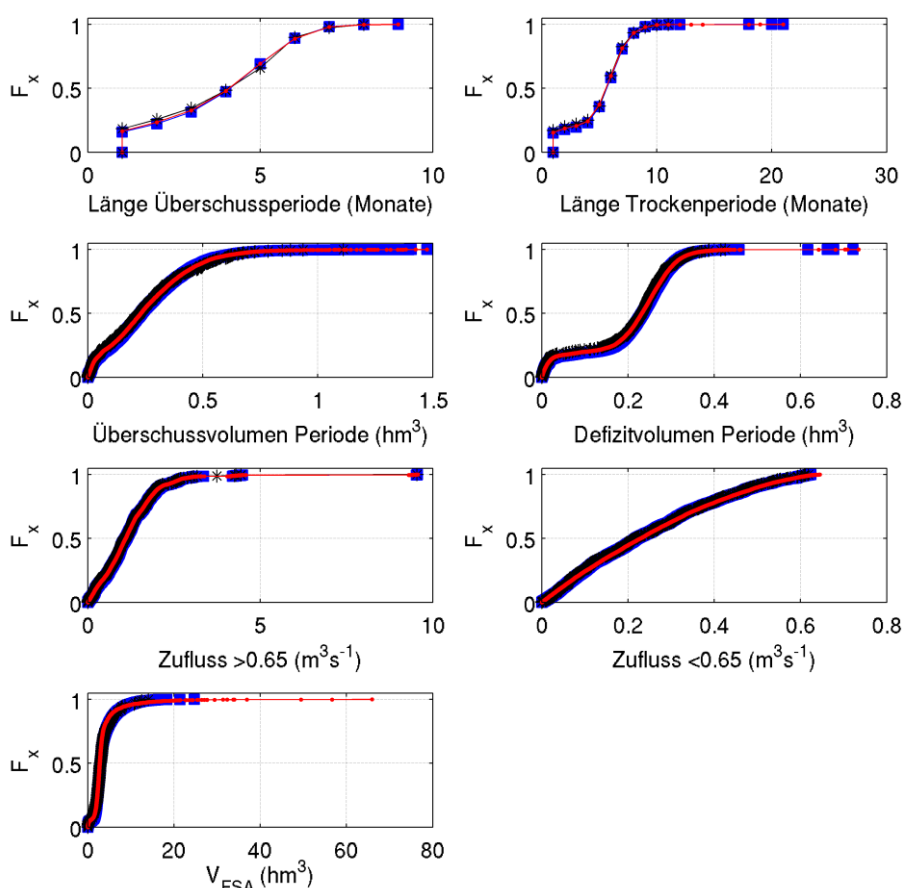


Abbildung A41: Empirische kumulative Verteilungsfunktionen  $F_x$  unterschiedlicher Parameter für Trockenperioden und Überschussperioden (Reanalysezeitraum 2071-2100, WETT-REG2010, A2). Als Schwellenwert ist  $0,65 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  angesetzt, der Zufluss ist die Summe der lokalen Zuflüsse A und B. Schwarz dargestellt sind die beobachteten Zuflüsse, blau die Zuflüsse des hkn Modells und rot die Zuflüsse des hkn-sma Modells.

WETTREG2010, B1, Zeitscheibe 1991-2020

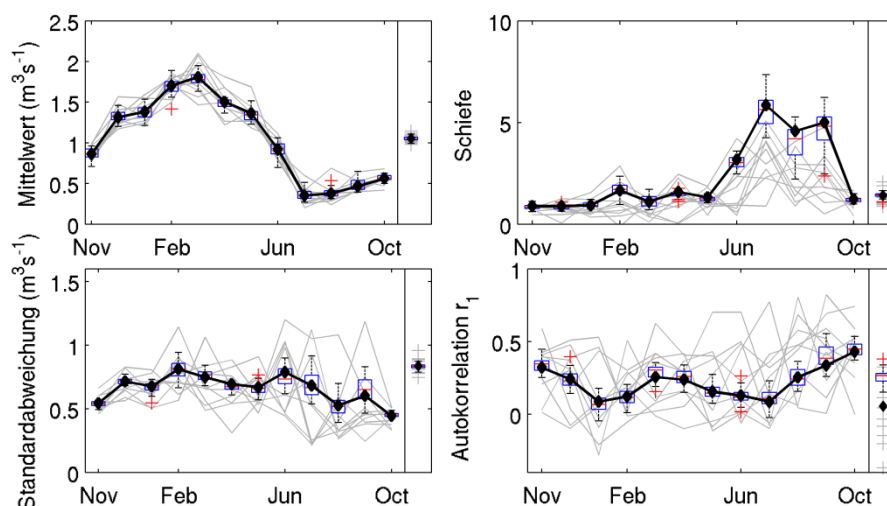


Abbildung A42: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte (Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe, Autokorrelationskoeffizient  $r_1$ ) für den lokalen Zufluss A für den Zeitraum 1991-2020, WETTREG2010, B1. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hkn-sm-Modells sind als Boxplots dargestellt.

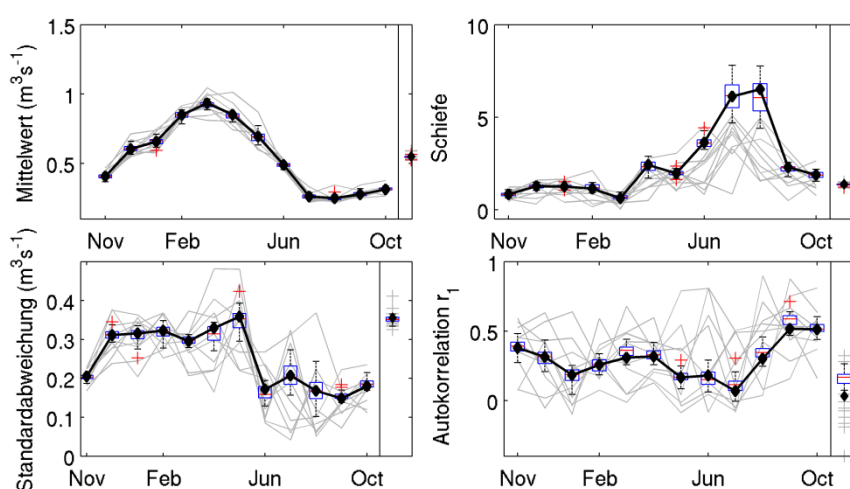


Abbildung A43: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte (Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe, Autokorrelationskoeffizient  $r_1$ ) für den lokalen Zufluss C für den Zeitraum 1991-2020, B1, WETTREG2010. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hkn-sm-Modells sind als Boxplots dargestellt.

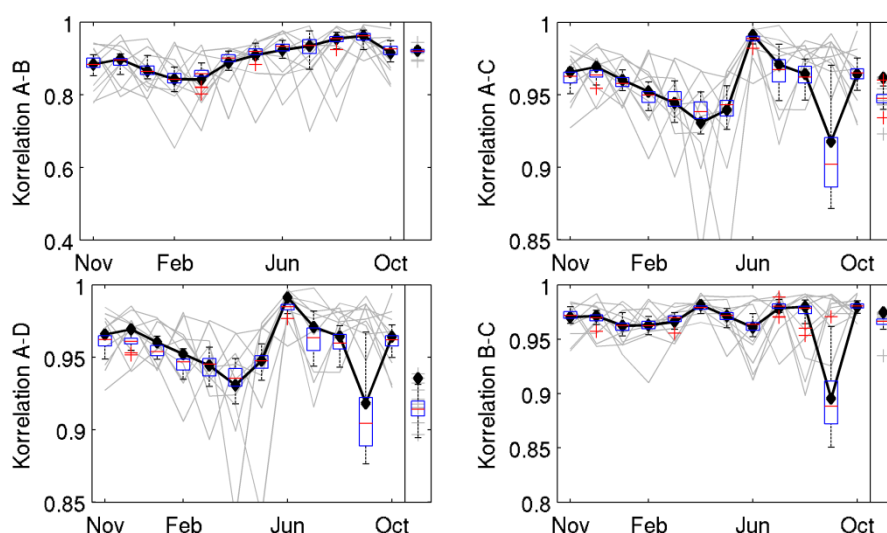


Abbildung A44: Vergleich ausgesuchter monatlicher und jährlicher Kreuzkorrelationen zwischen lokalen Zuflüssen des Zeitraums 1991-2020, B1 für das regionale Klimamodell WETTREG2010. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hknn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

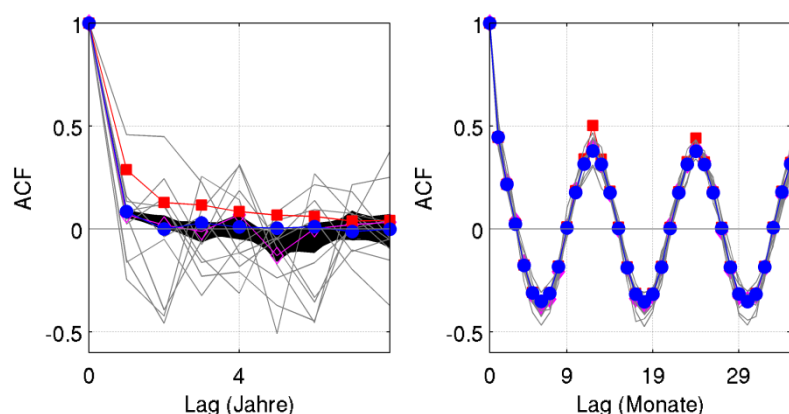


Abbildung A45: Autokorrelogramm auf jährlicher Zeitskala (links) und monatlicher Zeitskala (rechts) für den Zeitraum 1991-2020, WETTREG2010, B1. In grau sind die Autokorrelogramme der zehn einzelnen Realisationen dargestellt, in schwarz die Bandbreite aus den Rekombinationen des Gesamtdatensatzes. Weiterhin sind dargestellt: hknn-sma Modell (rot), hknn Modell (blau) und verwendeter Gesamtdatensatz (magenta).

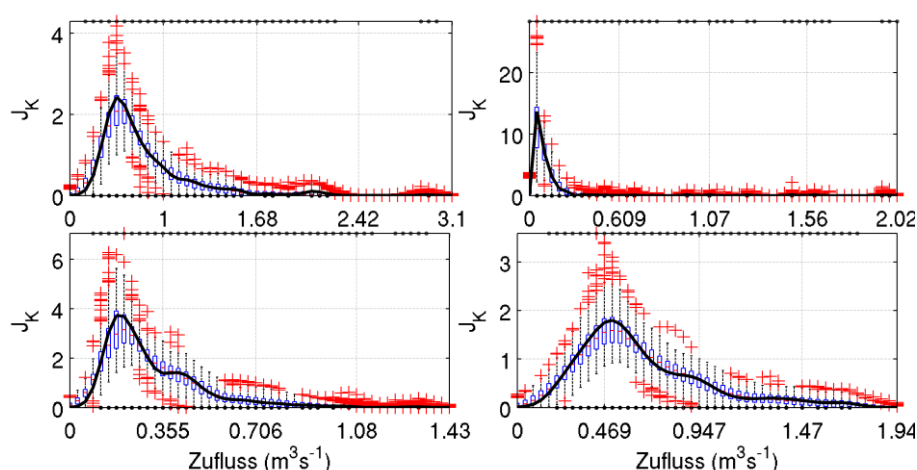


Abbildung A46: Marginale Dichtefunktionen  $J_K$  der Zuflüsse des Zeitraums 1991-2020, WETT-REG2010, B1, in den Monaten Januar (oben links), April (oben rechts), Juni (unten links) und Oktober (unten rechts) für den lokalen Zufluss A.  $J_K$  der beobachteten Zuflüsse ist als schwarze Linie dargestellt. Boxplots zeigen die marginalen Dichtefunktionen der simulierten Zuflüsse.

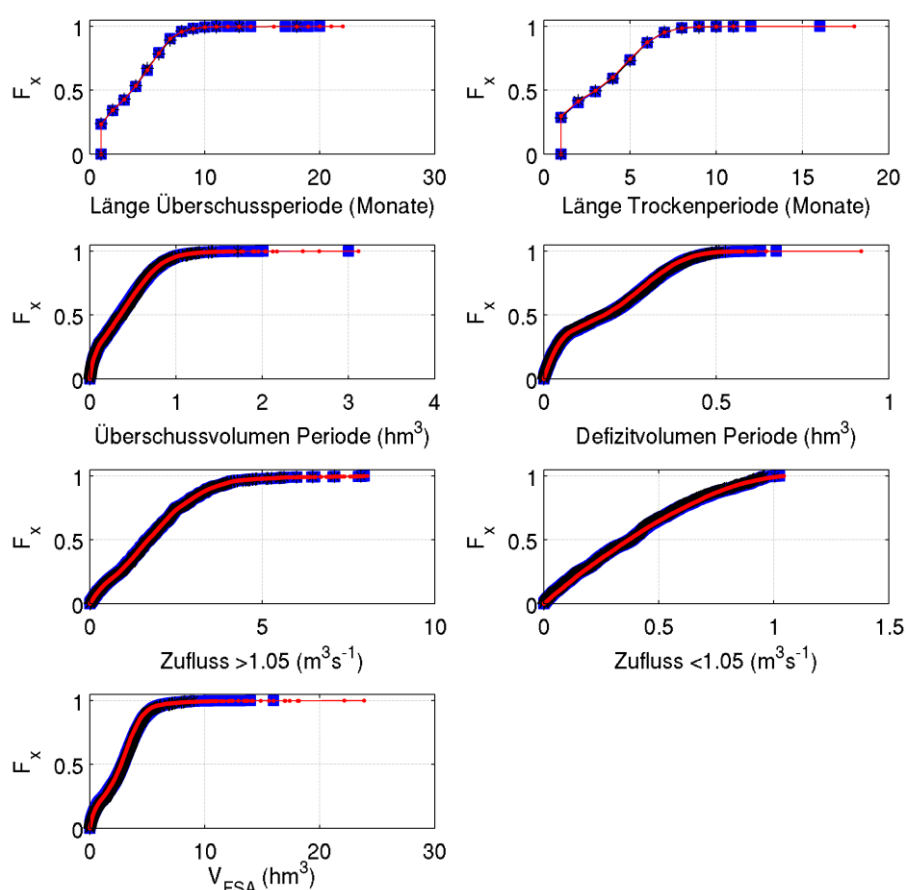


Abbildung A47: Empirische kumulative Verteilungsfunktionen  $F_x$  unterschiedlicher Parameter für Trockenperioden und Überschussperioden (Reanalysezeitraum 1961-1990, WETT-REG2010, B1). Als Schwellenwert ist  $1.05 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  angesetzt, der Zufluss ist die Summe der lokalen Zuflüsse A und B. Schwarz dargestellt sind die beobachteten Zuflüsse, blau die Zuflüsse des hkn Modells und rot die Zuflüsse des hkn-sma Modells.

WETTREG2010, B1, Zeitscheibe 2021-2050

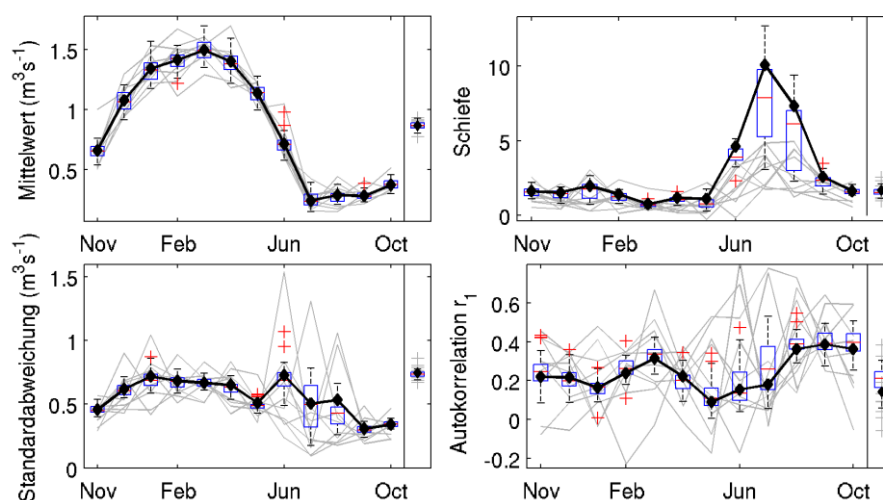


Abbildung A48: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte (Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe, Autokorrelationskoeffizient  $r_1$ ) für den lokalen Zufluss A für den Zeitraum 2021-2050, WETTREG2010, B1. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hknn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

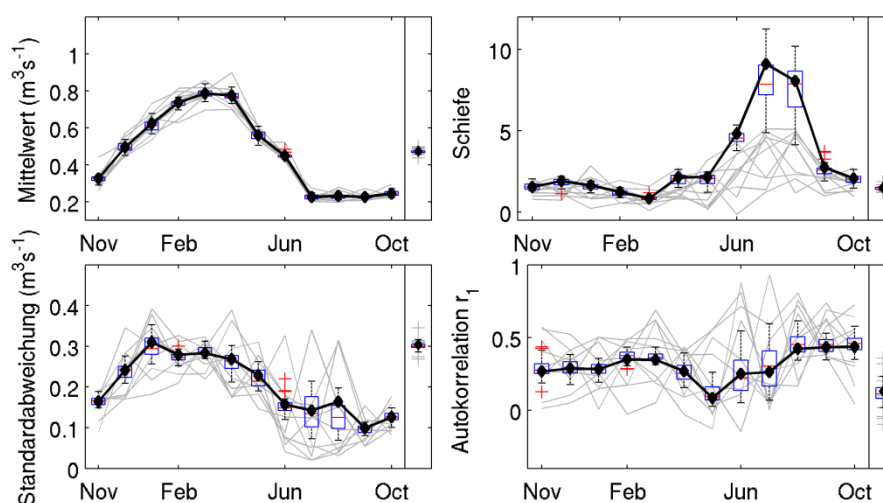


Abbildung A49: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte (Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe, Autokorrelationskoeffizient  $r_1$ ) für den lokalen Zufluss C für den Zeitraum 2021-2050, WETTREG2010, B1. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hknn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.



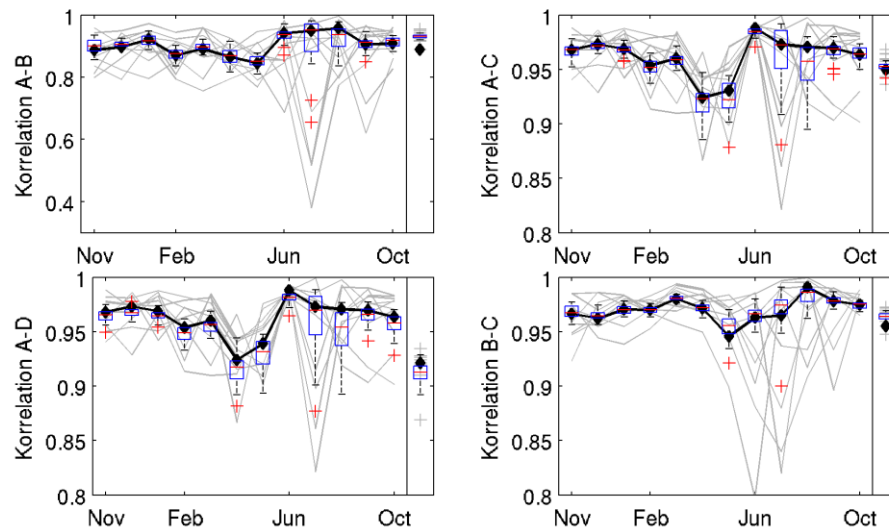


Abbildung A50: Vergleich ausgesuchter monatlicher und jährlicher Kreuzkorrelationen zwischen lokalen Zuflüssen des Zeitraums 2021-2050, B1 für das regionale Klimamodell WETTREG2010. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hknn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

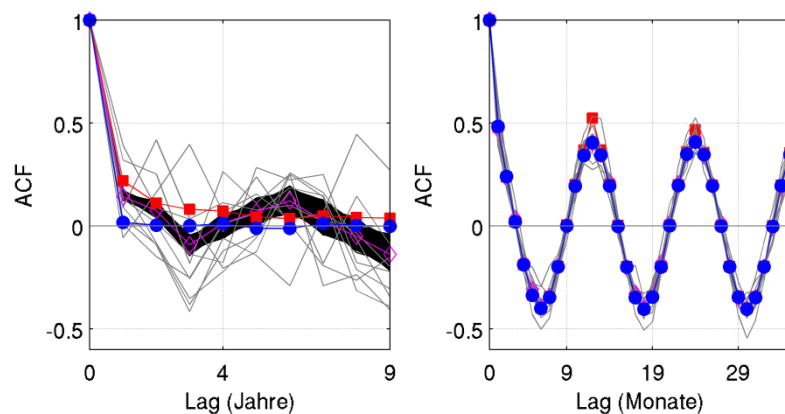


Abbildung A51: Autokorrelogramm auf jährlicher Zeitskala (links) und monatlicher Zeitskala (rechts) für den Zeitraum 2021-2050, WETTREG2010, B1. In grau sind die Autokorrelogramme der zehn einzelnen Realisationen dargestellt, in schwarz die Bandbreite aus den Rekombinationen des Gesamtdatensatzes. Weiterhin sind dargestellt: hknn-sma Modell (rot), hknn Modell (blau) und verwendeter Gesamtdatensatz (magenta).

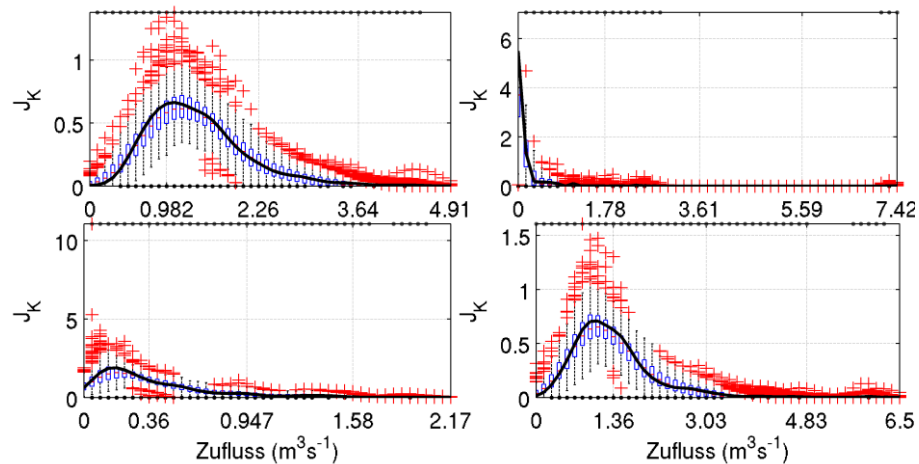


Abbildung A52: Marginale Dichtefunktionen  $J_K$  der Zuflüsse des Zeitraums 2021-2050, WETT-REG2010, B1, in den Monaten Januar (oben links), April (oben rechts), Juni (unten links) und Oktober (unten rechts) für den lokalen Zufluss A.  $J_K$  der beobachteten Zuflüsse ist als schwarze Linie dargestellt. Boxplots zeigen die marginalen Dichtefunktionen der simulierten Zuflüsse.

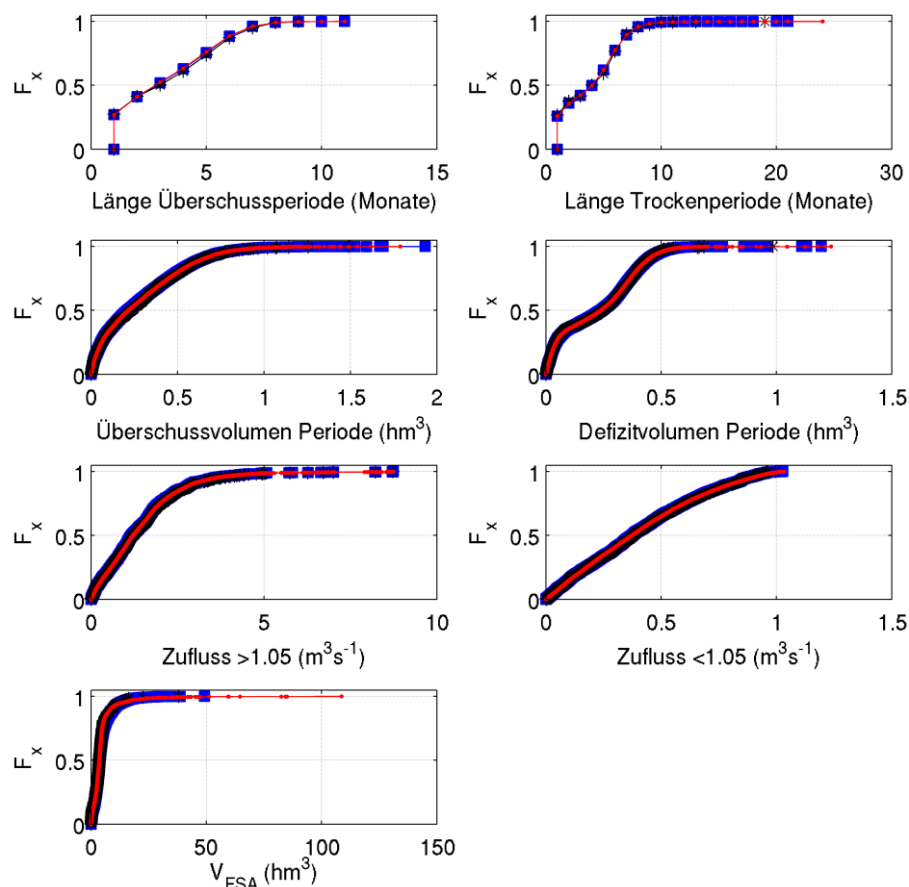


Abbildung A53: Empirische kumulative Verteilungsfunktionen  $F_x$  unterschiedlicher Parameter für Trockenperioden und Überschussperioden (Reanalysezeitraum 2021-2050, WETT-REG2010, B1). Als Schwellenwert ist  $1,05 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  angesetzt, der Zufluss ist die Summe der lokalen Zuflüsse A und B. Schwarz dargestellt sind die beobachteten Zuflüsse, blau die Zuflüsse des hkn Modells und rot die Zuflüsse des hkn-sma Modells.

WETTREG2010, B1, Zeitscheibe 2071-2100

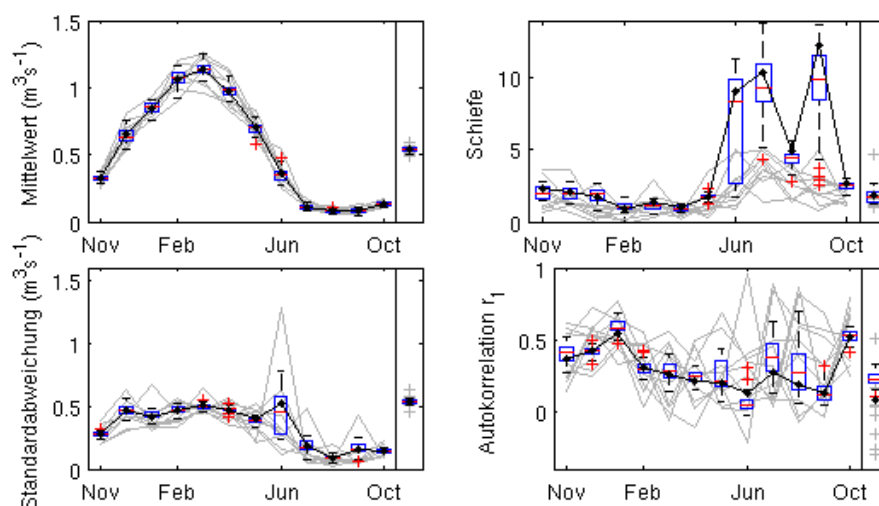


Abbildung A54: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte (Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe, Autokorrelationskoeffizient  $r_1$ ) für den lokalen Zufluss A für den

Zeitraum 2071-2100, WETTREG2010, B1. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hknn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

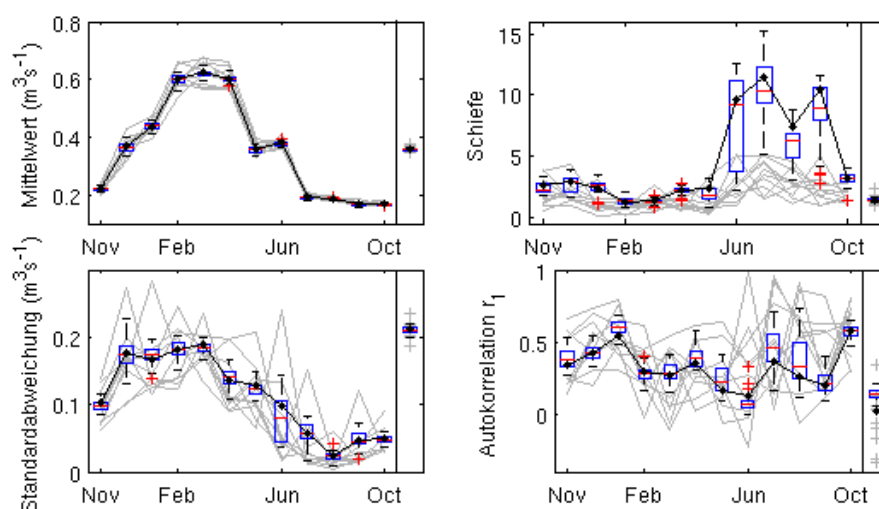


Abbildung A55: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte (Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe, Autokorrelationskoeffizient  $r_1$ ) für den lokalen Zufluss C für den

Zeitraum 2071-2100, WETTREG2010, B1. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hknn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

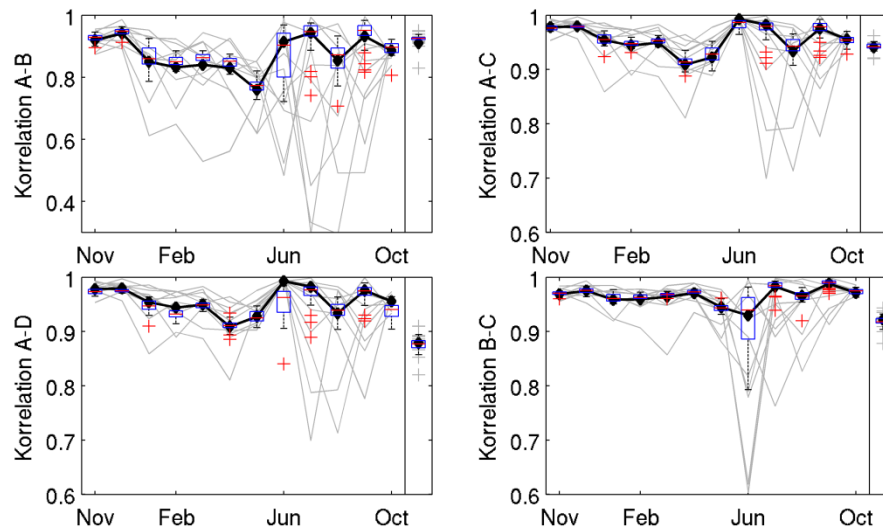


Abbildung A56: Vergleich ausgesuchter monatlicher und jährlicher Kreuzkorrelationen zwischen lokalen Zuflüssen des Zeitraums 2071-2100, B1 für das regionale Klimamodell WETTREG2010. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hknn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

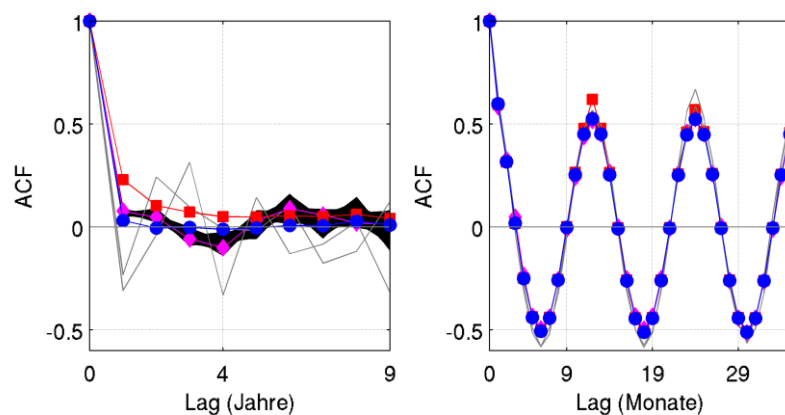


Abbildung A57: Autokorrelogramm auf jährlicher Zeitskala (links) und monatlicher Zeitskala (rechts) für den Zeitraum 2071-2100, WETTREG2010, B1. In grau sind die Autokorrelogramme der zehn einzelnen Realisationen dargestellt, in schwarz die Bandbreite aus den Rekombinationen des Gesamtdatensatzes. Weiterhin sind dargestellt: hknn-sma Modell (rot), hknn Modell (blau) und verwendeter Gesamtdatensatz (magenta).

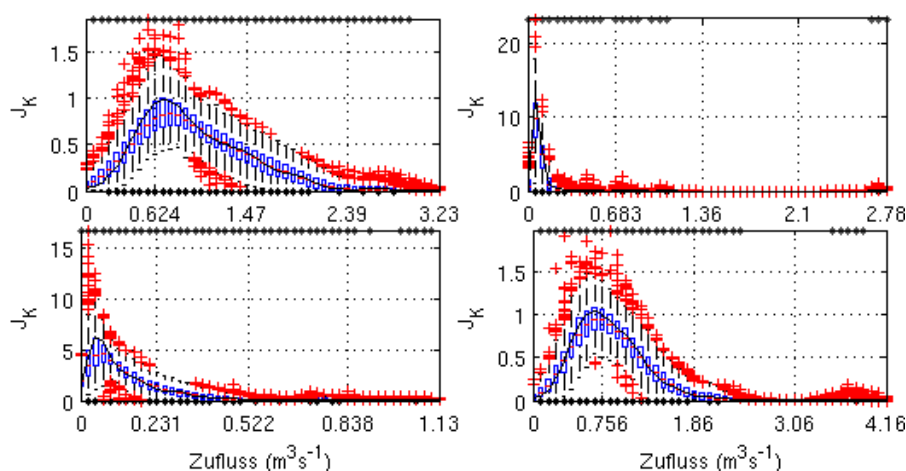


Abbildung A58: Marginale Dichtefunktionen  $J_K$  der Zuflüsse des Zeitraums 2071-2100, WETT-REG2010, B1, in den Monaten Januar (oben links), April (oben rechts), Juni (unten links) und Oktober (unten rechts) für den lokalen Zufluss A.  $J_K$  der beobachteten Zuflüsse ist als schwarze Linie dargestellt. Boxplots zeigen die marginalen Dichtefunktionen der simulierten Zuflüsse.

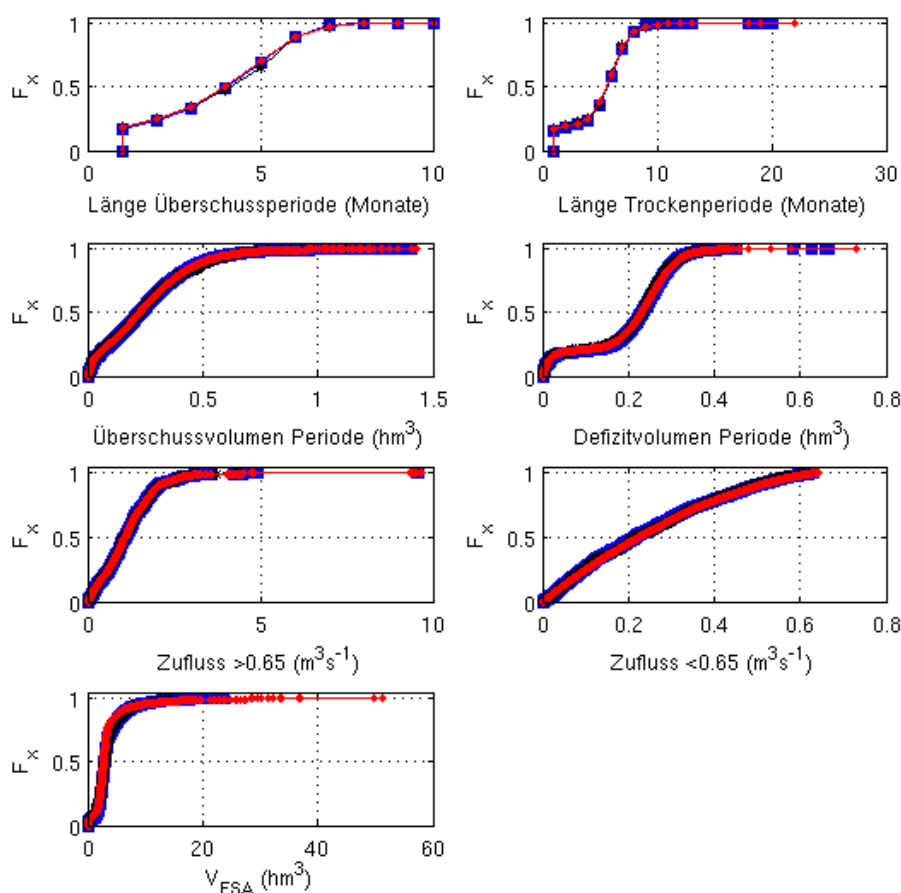


Abbildung A59: Empirische kumulative Verteilungsfunktionen  $F_x$  unterschiedlicher Parameter für Trockenperioden und Überschussperioden (Reanalysezeitraum 2071-2100, WETT-REG2010, B1). Als Schwellenwert ist  $0,65 m^3 s^{-1}$  angesetzt, der Zufluss ist die Summe der lokalen Zuflüsse A und B. Schwarz dargestellt sind die beobachteten Zuflüsse, blau die Zuflüsse des hkn Modells und rot die Zuflüsse des hkn-sma Modells.

## Regionales Klimamodell CLM

### CLM, A1B, Zeitscheibe 1991-2020

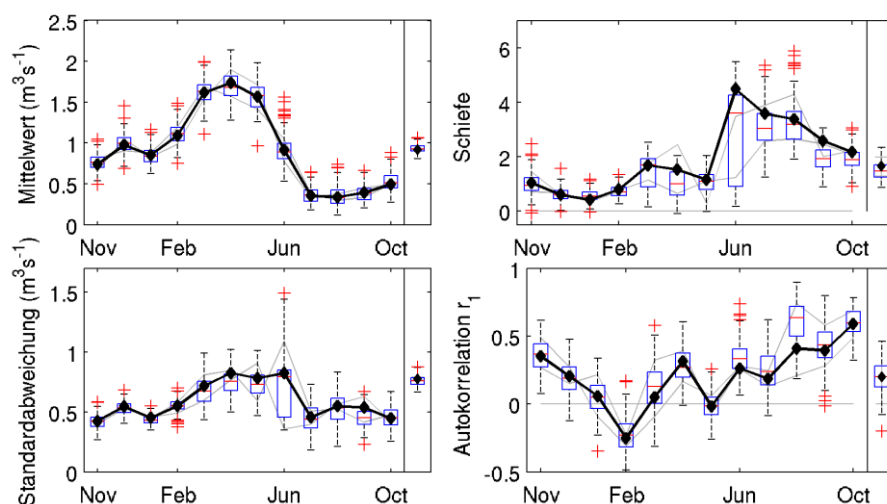


Abbildung A60: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte (Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe, Autokorrelationskoeffizient  $r_1$ ) für den lokalen Zufluss A für den Zeitraum 2071-2100, WETTREG2010, A2. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hkn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

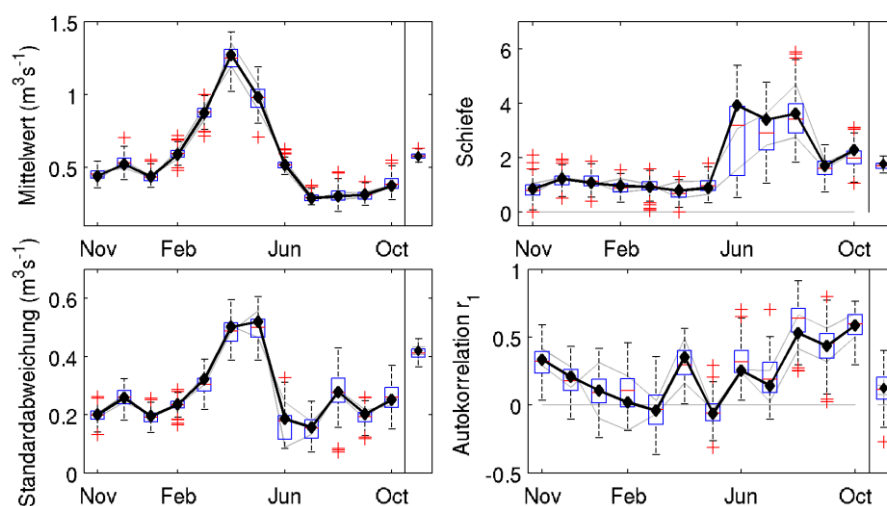


Abbildung A61: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte (Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe, Autokorrelationskoeffizient  $r_1$ ) für den lokalen Zufluss C für den Zeitraum 2071-2100, WETTREG2010, A2. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hkn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

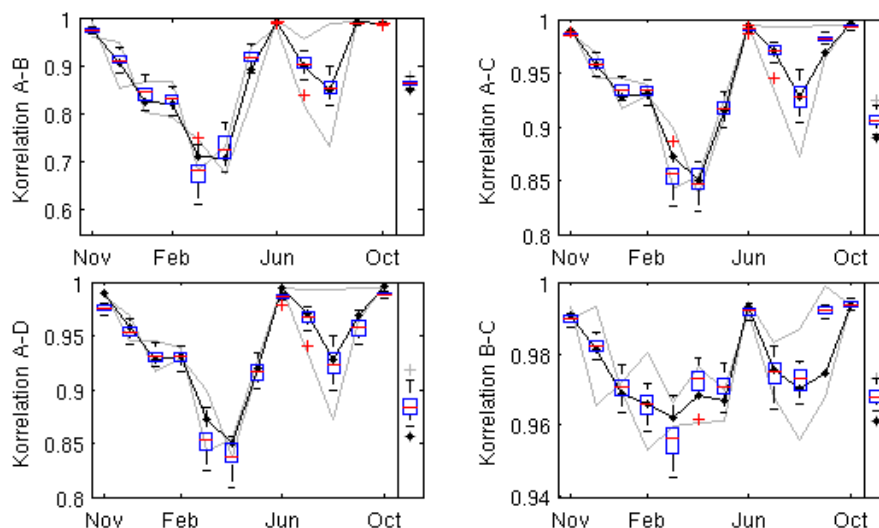


Abbildung A62: Vergleich ausgesuchter monatlicher und jährlicher Kreuzkorrelationen zwischen lokalen Zuflüssen des Zeitraums 1961-1990, A1B für das regionale Klimamodell CLM. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hknn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

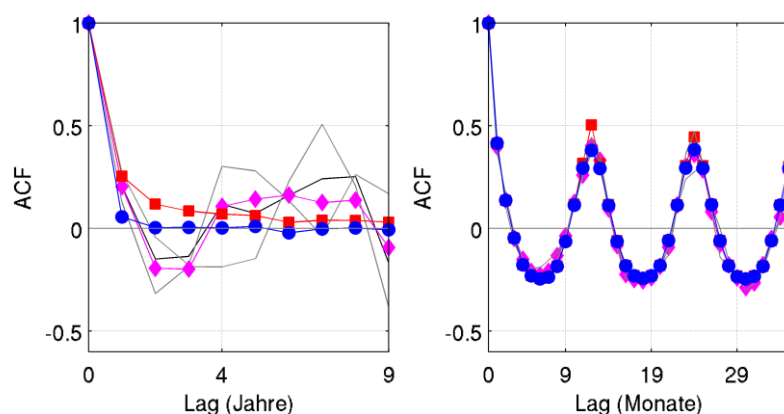


Abbildung A63: Autokorrelogramm auf jährlicher Zeitskala (links) und monatlicher Zeitskala (rechts) für den Zeitraum 1991-2020, CLM, A1B. In grau sind die Autokorrelogramme der zehn einzelnen Realisationen dargestellt, in schwarz die Bandbreite aus den Rekombinationen des Gesamtdatensatzes. Weiterhin sind dargestellt: hknn-sma Modell (rot), hknn Modell (blau) und verwendeter Gesamtdatensatz (magenta).



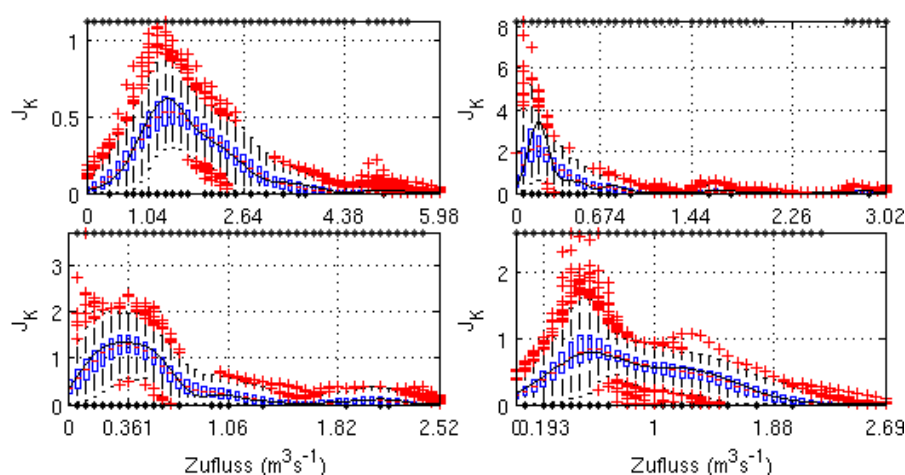


Abbildung A64: Marginale Dichtefunktionen  $J_K$  der Zuflüsse des Zeitraums 1991-2020, CLM, A1B, in den Monaten Januar (oben links), April (oben rechts), Juni (unten links) und Oktober (unten rechts) für den lokalen Zufluss A.  $J_K$  der beobachteten Zuflüsse ist als schwarze Linie dargestellt. Boxplots zeigen die marginalen Dichtefunktionen der simulierten Zuflüsse.

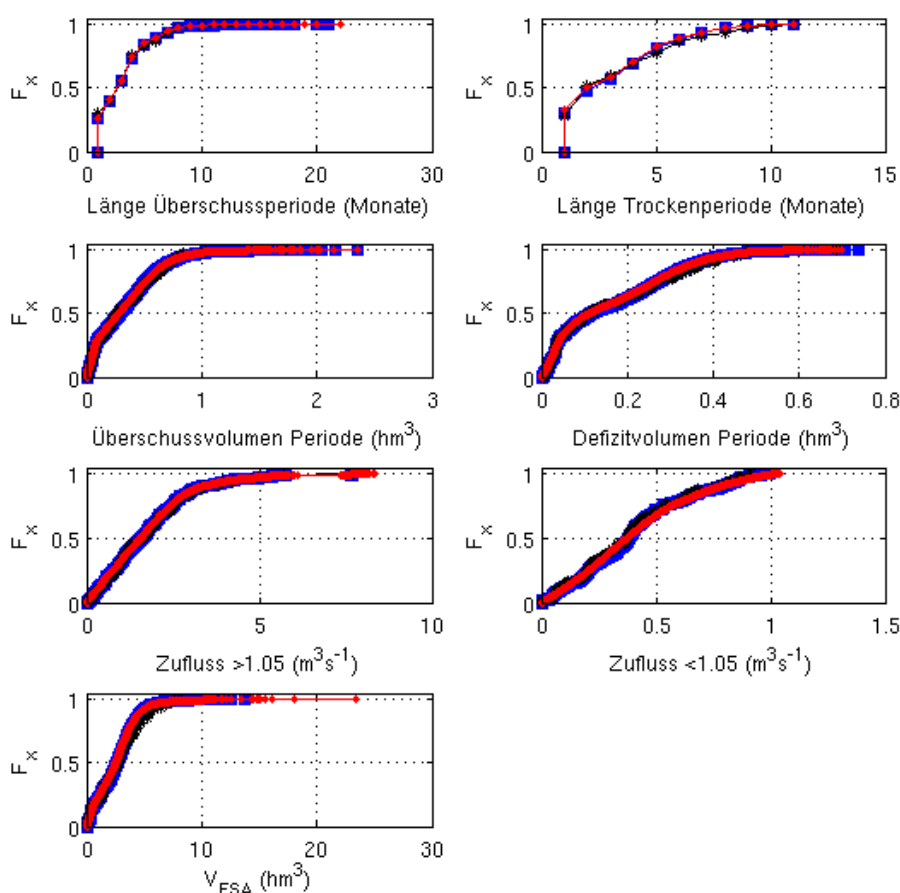


Abbildung A65: Empirische kumulative Verteilungsfunktionen  $F_x$  unterschiedlicher Parameter für Trockenperioden und Überschussperioden (Reanalysezeitraum 1961-1990, CLM, A1B). Als Schwellenwert ist  $1,05 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  angesetzt, der Zufluss ist die Summe der lokalen Zuflüsse A und B. Schwarz dargestellt sind die beobachteten Zuflüsse, blau die Zuflüsse des hkn Modells und rot die Zuflüsse des hkn-sma Modells.

CLM, A1B, Zeitscheibe 2021-2050

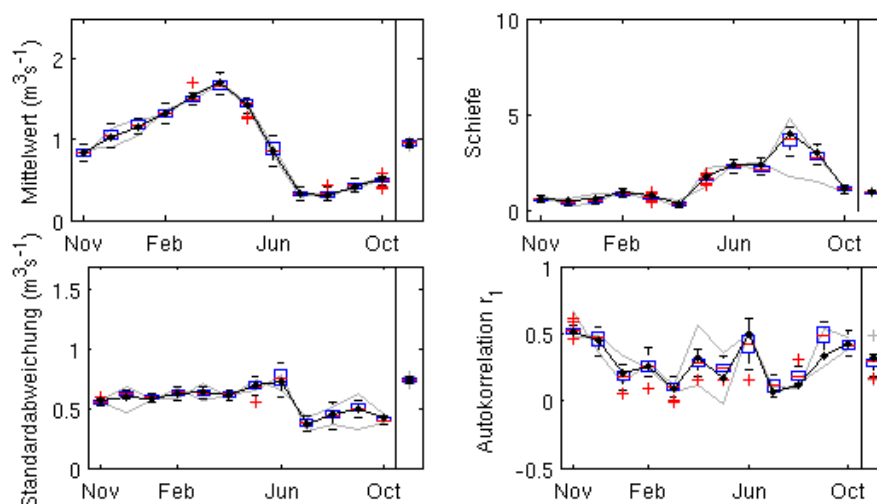


Abbildung A66: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte (Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe, Autokorrelationskoeffizient  $r_1$ ) für den lokalen Zufluss A für den Zeitraum 2071-2100, WETTREG2010, A2. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hkn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

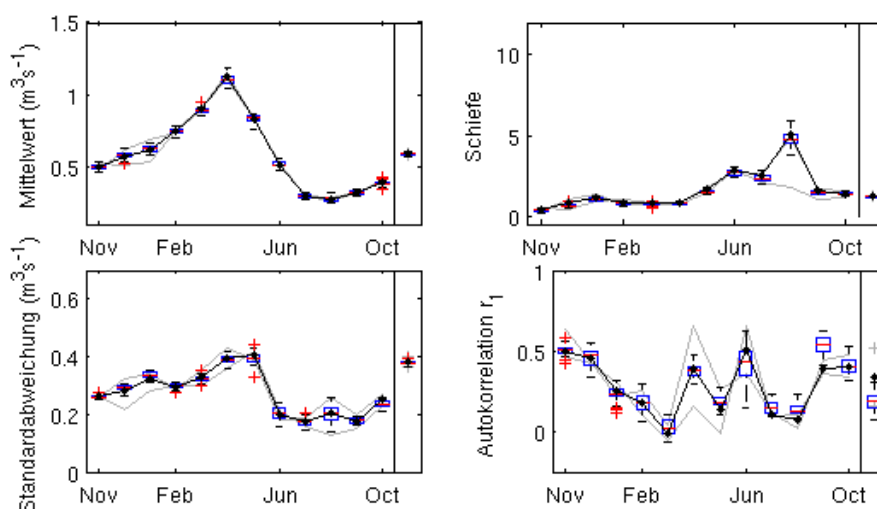


Abbildung A67: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte (Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe, Autokorrelationskoeffizient  $r_1$ ) für den lokalen Zufluss C für den Zeitraum 2071-2100, WETTREG2010, A2. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hkn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

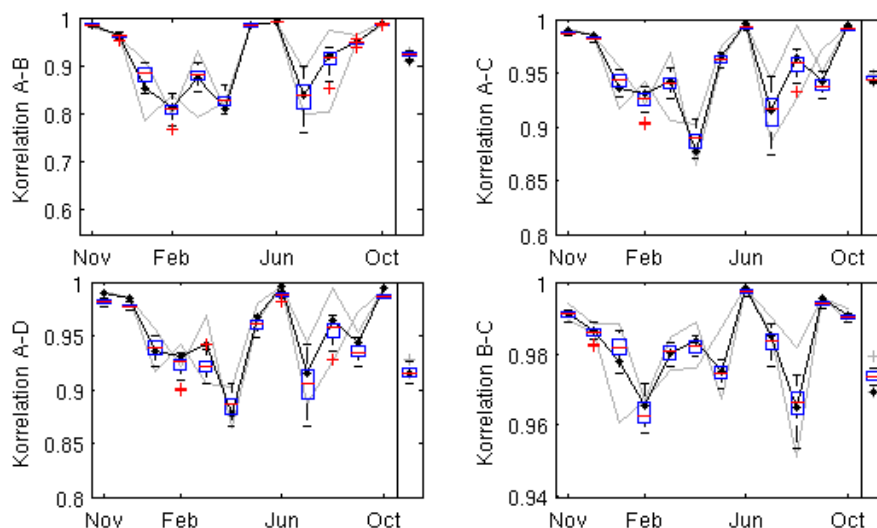


Abbildung A68: Vergleich ausgesuchter monatlicher und jährlicher Kreuzkorrelationen zwischen lokalen Zuflüssen des Zeitraums 2021-2050, A1B für das regionale Klimamodell CLM. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hkn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

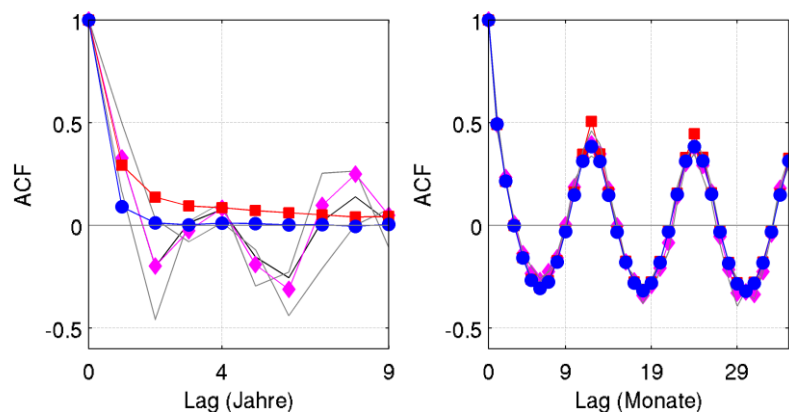


Abbildung A69: Autokorrelogramm auf jährlicher Zeitskala (links) und monatlicher Zeitskala (rechts) für den Zeitraum 2021\_2050, CLM, A1B. In grau sind die Autokorrelogramme der zehn einzelnen Realisationen dargestellt, in schwarz die Bandbreite aus den Rekombinationen des Gesamtdatensatzes. Weiterhin sind dargestellt: hkn-sma Modell (rot), hkn Modell (blau) und verwendeter Gesamtdatensatz (magenta).

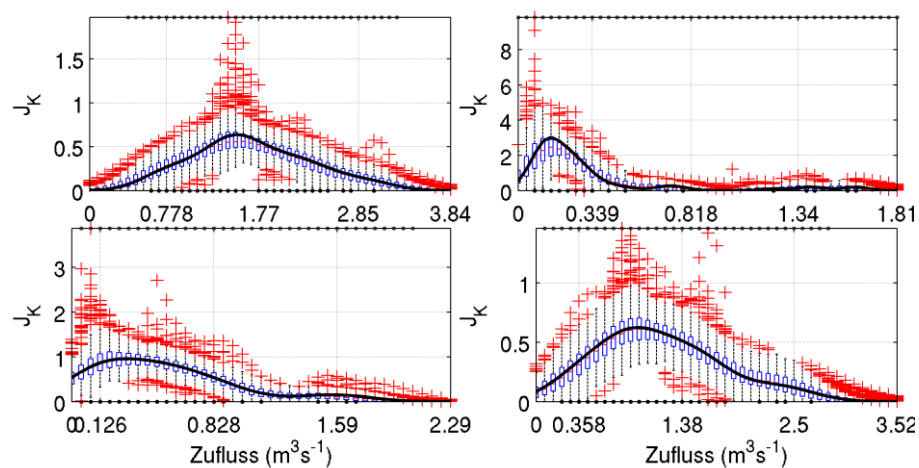


Abbildung A70: Marginale Dichtefunktionen  $J_K$  der Zuflüsse des Zeitraums 2021-2050, CLM, A1B, in den Monaten Januar (oben links), April (oben rechts), Juni (unten links) und Oktober (unten rechts) für den lokalen Zufluss A.  $J_K$  der beobachteten Zuflüsse ist als schwarze Linie dargestellt. Boxplots zeigen die marginalen Dichtefunktionen der simulierten Zuflüsse.

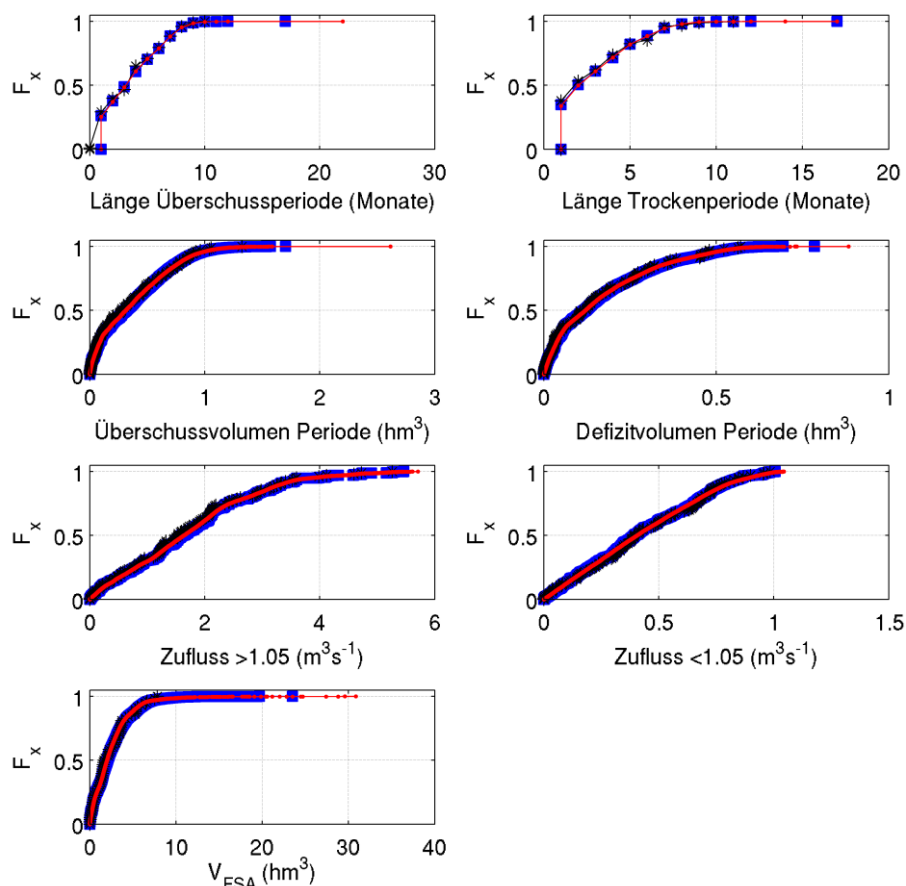


Abbildung A71: Empirische kumulative Verteilungsfunktionen  $F_x$  unterschiedlicher Parameter für Trockenperioden und Überschussperioden (Reanalysezeitraum 2021-2050, CLM, A1B). Als Schwellenwert ist  $1,05 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  angesetzt, der Zufluss ist die Summe der lokalen Zuflüsse A und B. Schwarz dargestellt sind die beobachteten Zuflüsse, blau die Zuflüsse des hkn Modells und rot die Zuflüsse des hkn-sma Modells.

CLM, A1B, Zeitscheibe 2071-2100

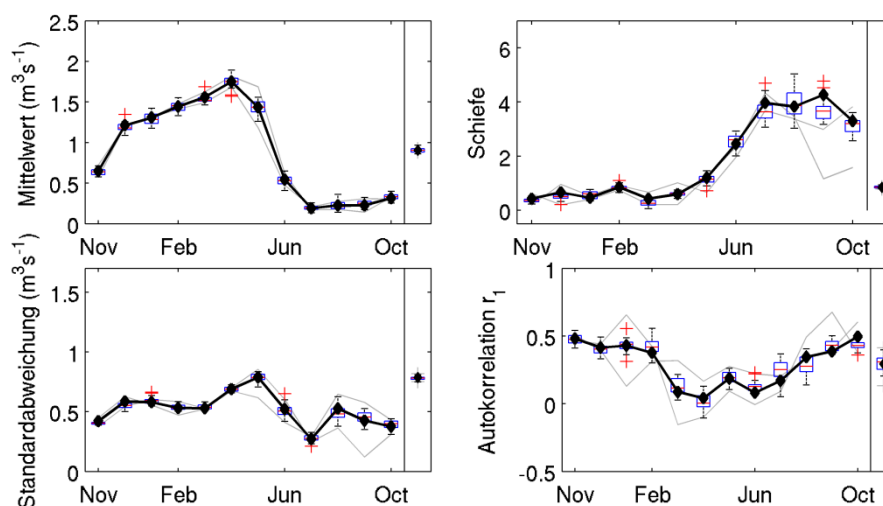


Abbildung A72: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte (Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe, Autokorrelationskoeffizient  $r_1$ ) für den lokalen Zufluss A für den Zeitraum 2071-2100, WETTREG2010, A2. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hkn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

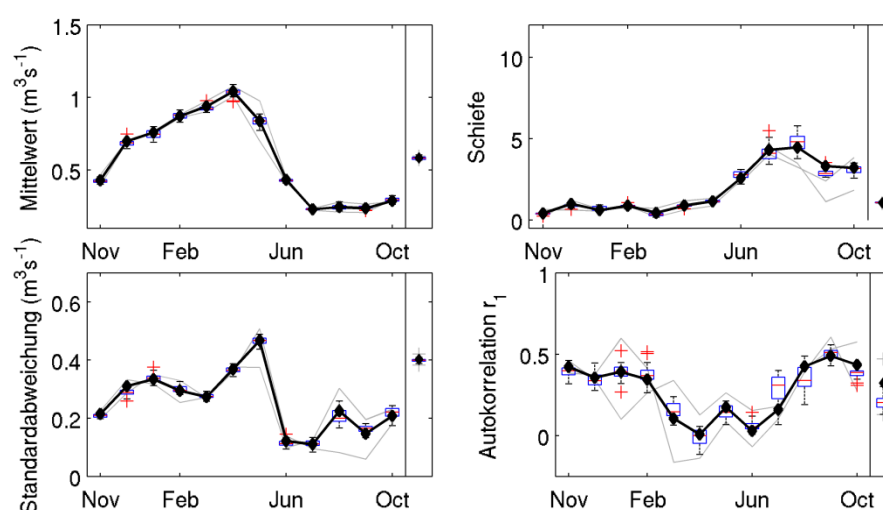


Abbildung A73: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte (Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe, Autokorrelationskoeffizient  $r_1$ ) für den lokalen Zufluss C für den Zeitraum 2071-2100, WETTREG2010, A2. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hkn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

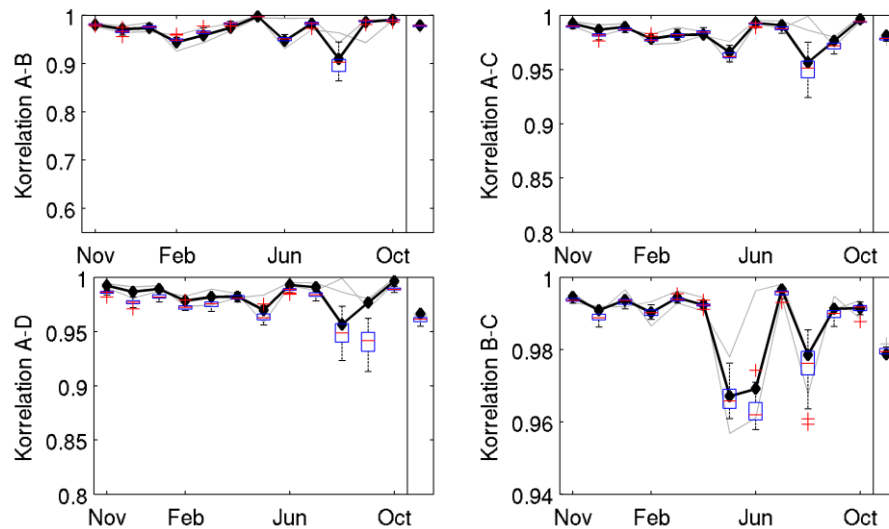


Abbildung A74: Vergleich ausgesuchter monatlicher und jährlicher Kreuzkorrelationen zwischen lokalen Zuflüssen des Zeitraums 2071-2100, B1 für das regionale Klimamodell CLM. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hknn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

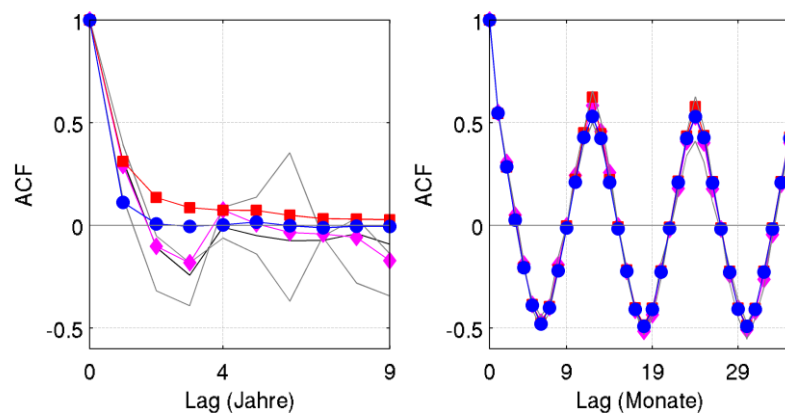


Abbildung A 75: Autokorrelogramm auf jährlicher Zeitskala (links) und monatlicher Zeitskala (rechts) für den Zeitraum 2071-2100, CLM, A1B. In grau sind die Autokorrelogramme der zehn einzelnen Realisationen dargestellt, in schwarz die Bandbreite aus den Rekombinationen des Gesamtdatensatzes. Weiterhin sind dargestellt: hknn-sma Modell (rot), hknn Modell (blau) und verwendeter Gesamtdatensatz (magenta).

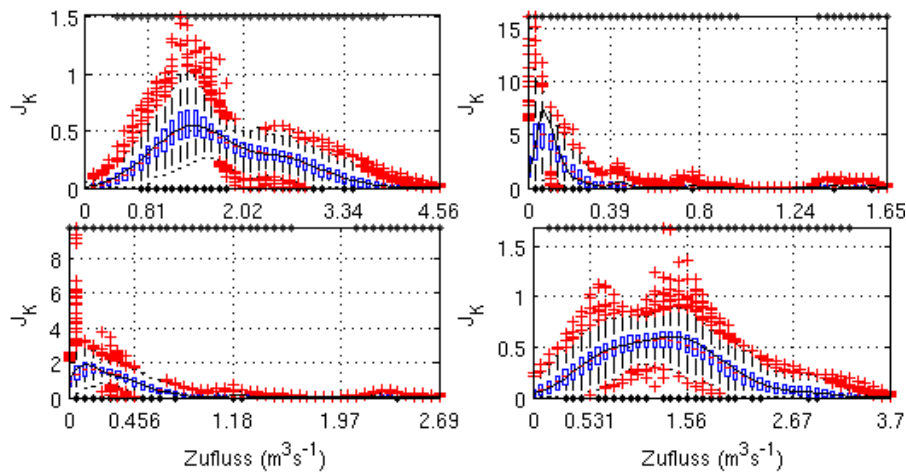


Abbildung A76: Marginale Dichtefunktionen  $J_K$  der Zuflüsse des Zeitraums 2071-2100, CLM, A1B, in den Monaten Januar (oben links), April (oben rechts), Juni (unten links) und Oktober (unten rechts) für den lokalen Zufluss A.  $J_K$  der beobachteten Zuflüsse ist als schwarze Linie dargestellt. Boxplots zeigen die marginalen Dichtefunktionen der simulierten Zuflüsse.

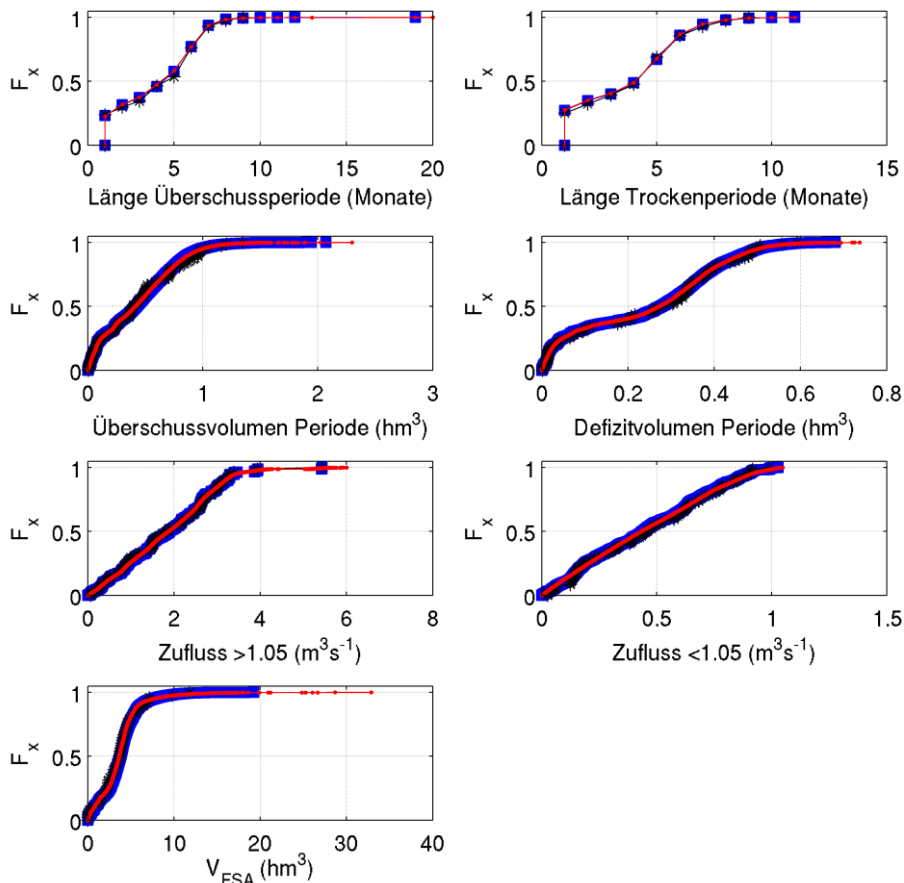


Abbildung A77: Empirische kumulative Verteilungsfunktionen  $F_x$  unterschiedlicher Parameter für Trockenperioden und Überschussperioden (Reanalysezeitraum 2071-2100, CLM, A1B). Als Schwellenwert ist  $0,65 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  angesetzt, der Zufluss ist die Summe der lokalen Zuflüsse A und B. Schwarz dargestellt sind die beobachteten Zuflüsse, blau die Zuflüsse des hkn Modells und rot die Zuflüsse des hkn-sma Modells.



CLM, B1, Zeitscheibe 1991-2020

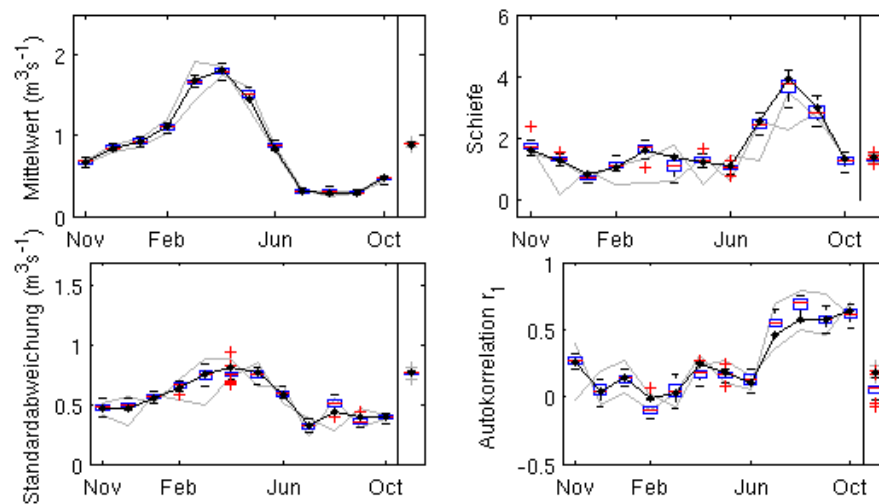


Abbildung A78: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte (Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe, Autokorrelationskoeffizient  $r_1$ ) für den lokalen Zufluss A für den Zeitraum 2071-2100, WETTREG2010, A2. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hkn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

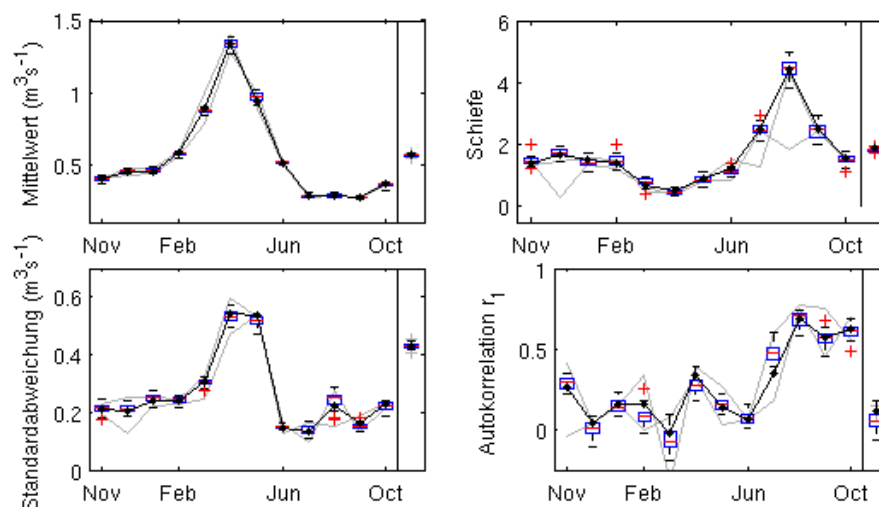


Abbildung A79: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte (Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe, Autokorrelationskoeffizient  $r_1$ ) für den lokalen Zufluss C für den Zeitraum 2071-2100, WETTREG2010, A2. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hkn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

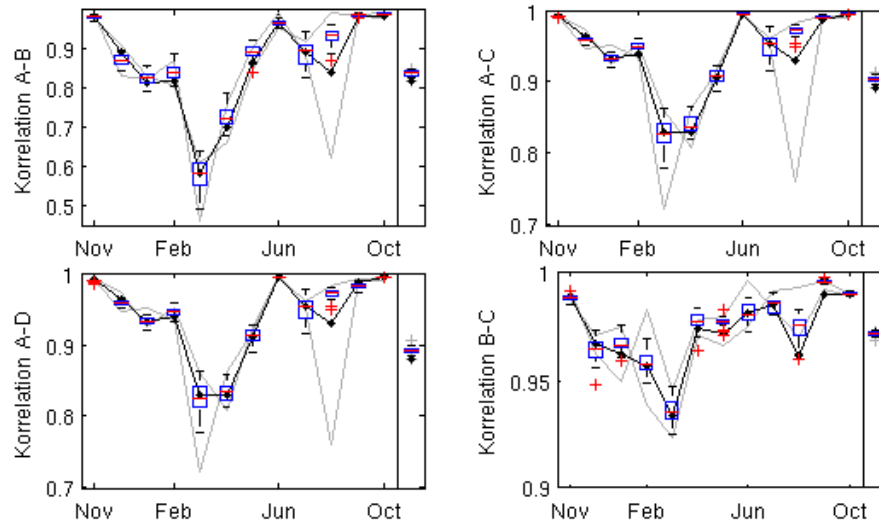


Abbildung A80: Vergleich ausgesuchter monatlicher und jährlicher Kreuzkorrelationen zwischen lokalen Zuflüssen des Zeitraums 1961-1990, B1 für das regionale Klimamodell CLM. Die Statistik des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hknn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

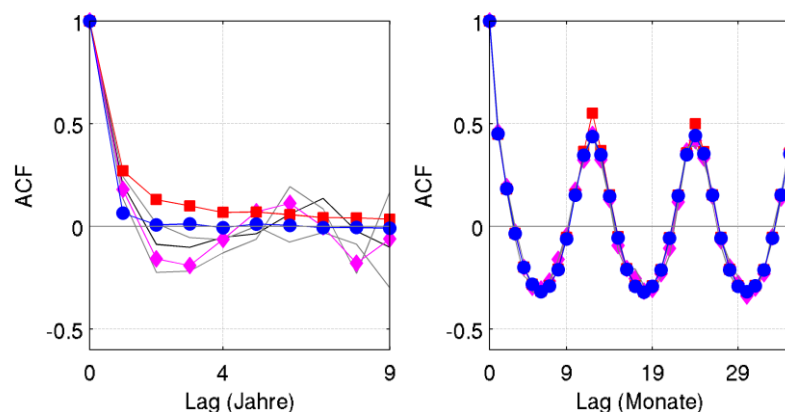


Abbildung A81: Autokorrelogramm auf jährlicher Zeitskala (links) und monatlicher Zeitskala (rechts) für den Zeitraum 1991-2020, CLM, B1. In grau sind die Autokorrelogramme der zehn einzelnen Realisationen dargestellt, in schwarz die Bandbreite aus den Rekombinationen des Gesamtdatensatzes. Weiterhin sind dargestellt: hknn-sma Modell (rot), hknn Modell (blau) und verwendeter Gesamtdatensatz (magenta).

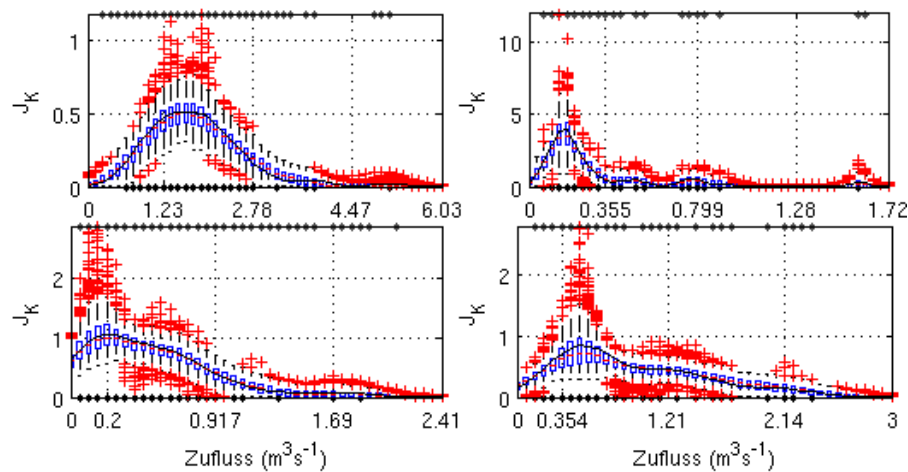


Abbildung A82: Marginale Dichtefunktionen  $J_K$  der Zuflüsse des Zeitraums 1991-2020, CLM, B1, in den Monaten Januar (oben links), April (oben rechts), Juni (unten links) und Oktober (unten rechts) für den lokalen Zufluss A.  $J_K$  der beobachteten Zuflüsse ist als schwarze Linie dargestellt. Boxplots zeigen die marginalen Dichtefunktionen der simulierten Zuflüsse.

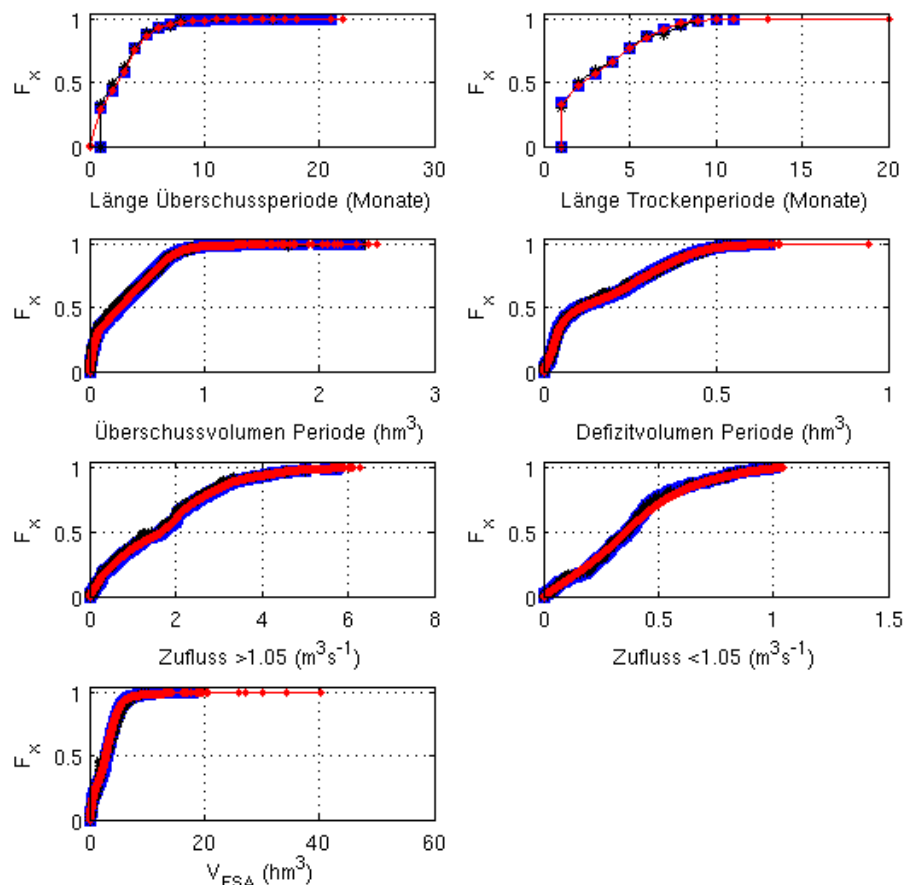


Abbildung A83: Empirische kumulative Verteilungsfunktionen  $F_x$  unterschiedlicher Parameter für Trockenperioden und Überschussperioden (Reanalysezeitraum 1961-1990, CLM, B1). Als Schwellenwert ist  $1,05 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  angesetzt, der Zufluss ist die Summe der lokalen Zuflüsse A und B. Schwarz dargestellt sind die beobachteten Zuflüsse, blau die Zuflüsse des hkn Modells und rot die Zuflüsse des hkn-sma Modells.

CLM, B1, Zeitscheibe 2021-2050

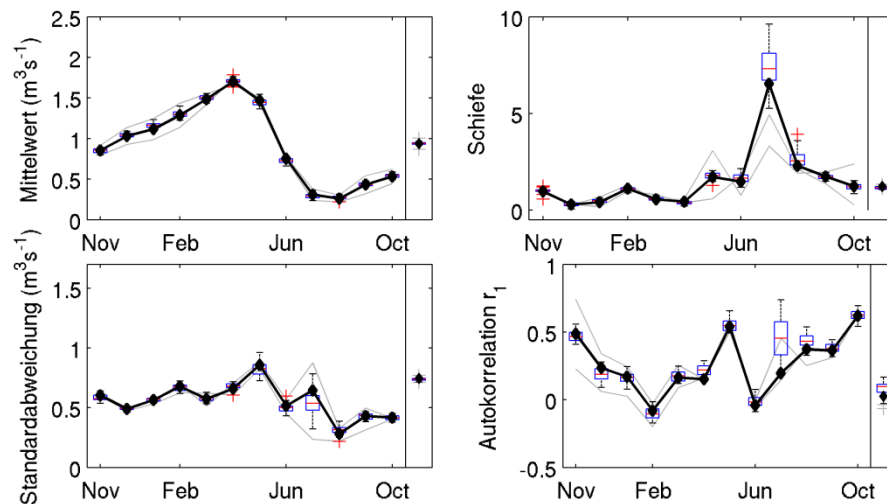


Abbildung A84: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte (Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe, Autokorrelationskoeffizient  $r_1$ ) für den lokalen Zufluss A für den Zeitraum 2071-2100, WETTREG2010, A2. Die Statistiken des Gesamtansatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hknn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

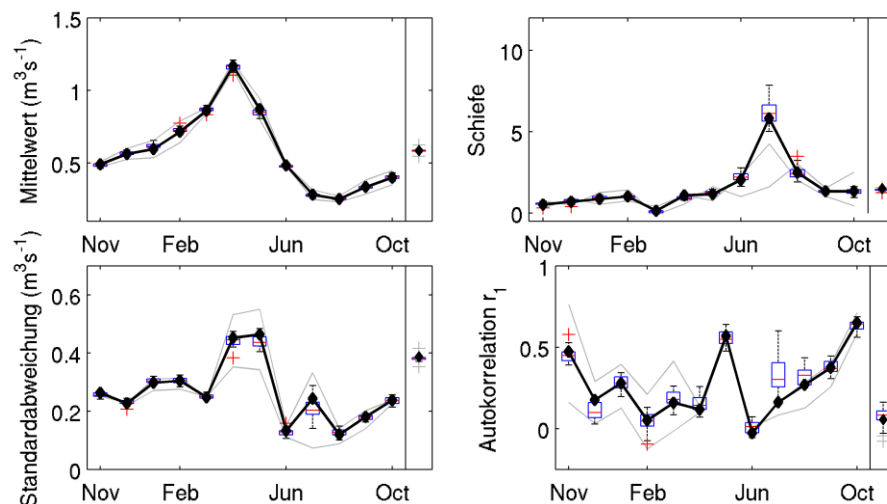


Abbildung A85: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte (Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe, Autokorrelationskoeffizient  $r_1$ ) für den lokalen Zufluss C für den Zeitraum 2071-2100, WETTREG2010, A2. Die Statistiken des Gesamtansatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hknn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

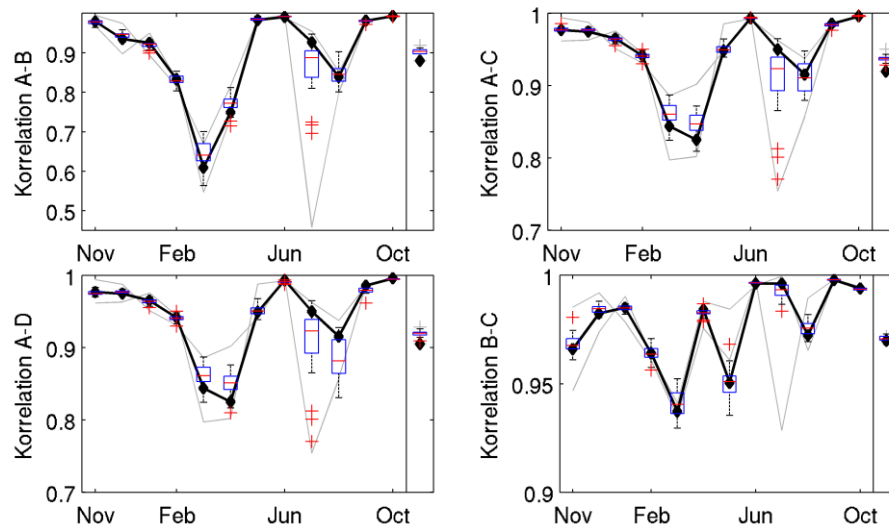


Abbildung A86: Vergleich ausgesuchter monatlicher und jährlicher Kreuzkorrelationen zwischen lokalen Zuflüssen des Zeitraums 2021-2050, B1 für das regionale Klimamodell CLM. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hknn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

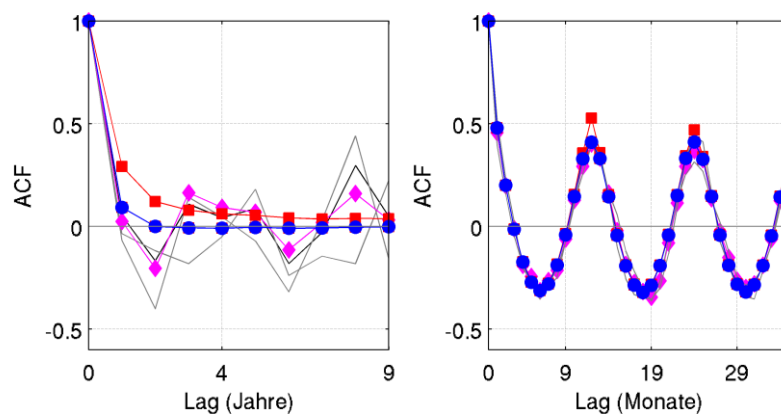


Abbildung A87: Autokorrelogramm auf jährlicher Zeitskala (links) und monatlicher Zeitskala (rechts) für den Zeitraum 2021-2050, CLM, B1. In grau sind die Autokorrelogramme der zehn einzelnen Realisationen dargestellt, in schwarz die Bandbreite aus den Rekombinationen des Gesamtdatensatzes. Weiterhin sind dargestellt: hknn-sma Modell (rot), hknn Modell (blau) und verwendeter Gesamtdatensatz (magenta).

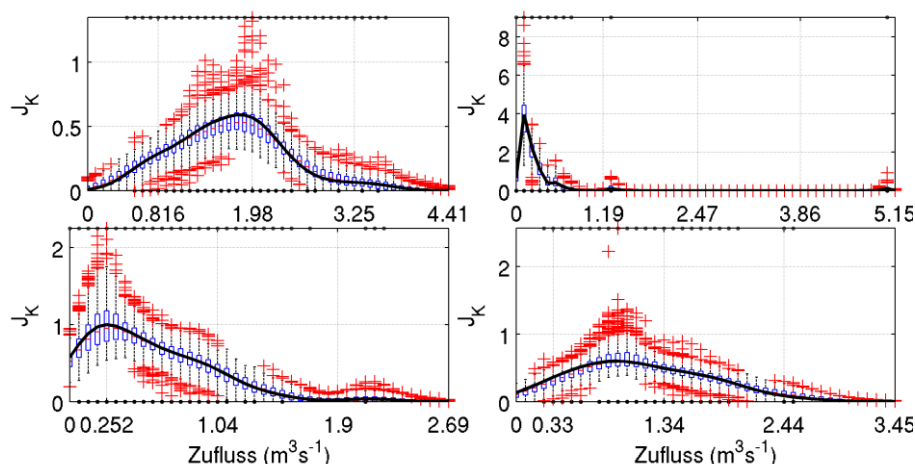


Abbildung A88: Marginale Dichtefunktionen  $J_K$  der Zuflüsse des Zeitraums 2021-2050, CLM, B1, in den Monaten Januar (oben links), April (oben rechts), Juni (unten links) und Oktober (unten rechts) für den lokalen Zufluss A.  $J_K$  der beobachteten Zuflüsse ist als schwarze Linie dargestellt. Boxplots zeigen die marginalen Dichtefunktionen der simulierten Zuflüsse.

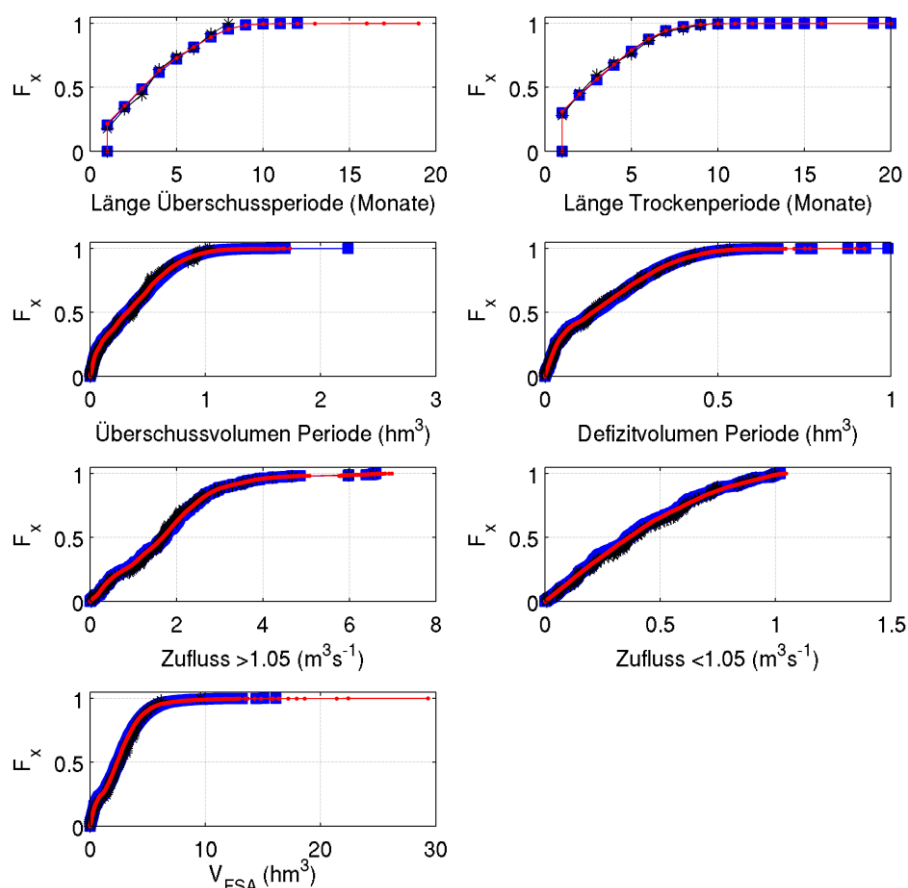


Abbildung A89: Empirische kumulative Verteilungsfunktionen  $F_x$  unterschiedlicher Parameter für Trockenperioden und Überschussperioden (Reanalysezeitraum 2021-2050, CLM, B1). Als Schwellenwert ist  $1,05 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  angesetzt, der Zufluss ist die Summe der lokalen Zuflüsse A und B. Schwarz dargestellt sind die beobachteten Zuflüsse, blau die Zuflüsse des hknn Modells und rot die Zuflüsse des hknn-sma Modells.

CLM, B1, Zeitscheibe 2071-2100

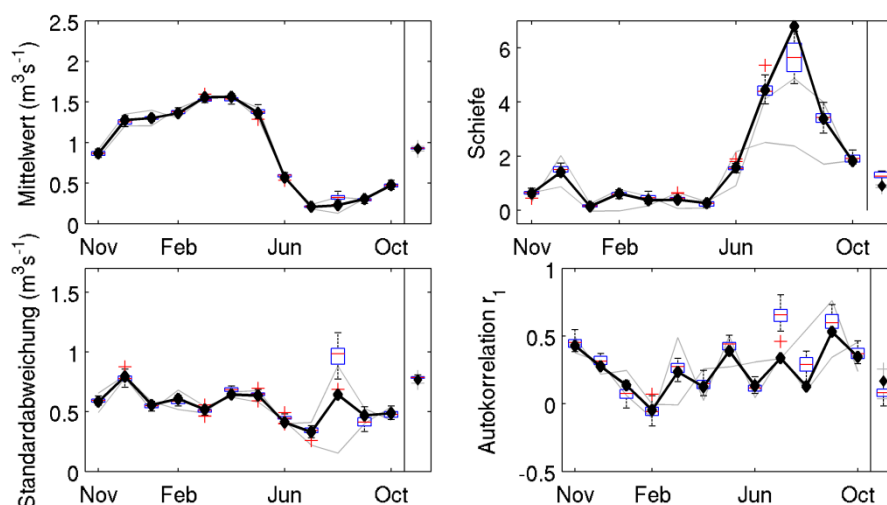


Abbildung A90: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte (Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe, Autokorrelationskoeffizient  $r_1$ ) für den lokalen Zufluss A für den Zeitraum 2071-2100, CLM, A2. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hknn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

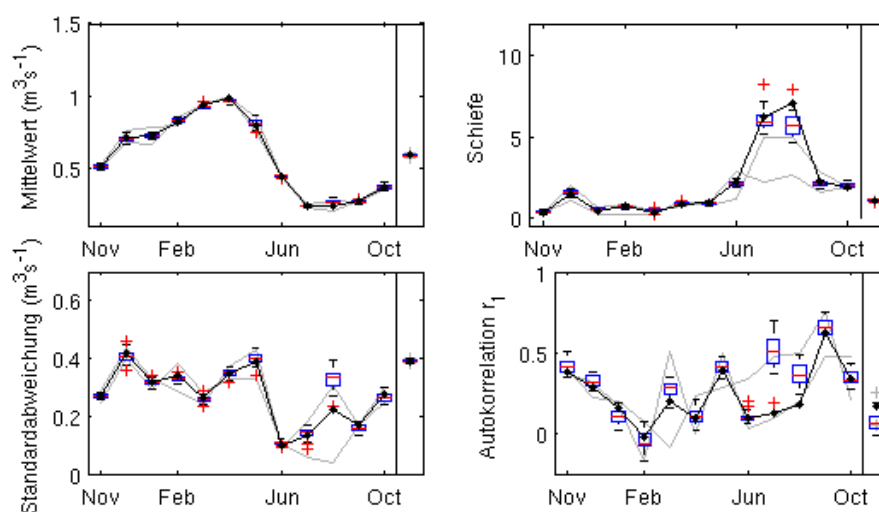


Abbildung A91: Vergleich monatlicher und jährlicher statistischer Kennwerte (Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe, Autokorrelationskoeffizient  $r_1$ ) für den lokalen Zufluss C für den Zeitraum 2071-2100, CLM, A2. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hknn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.



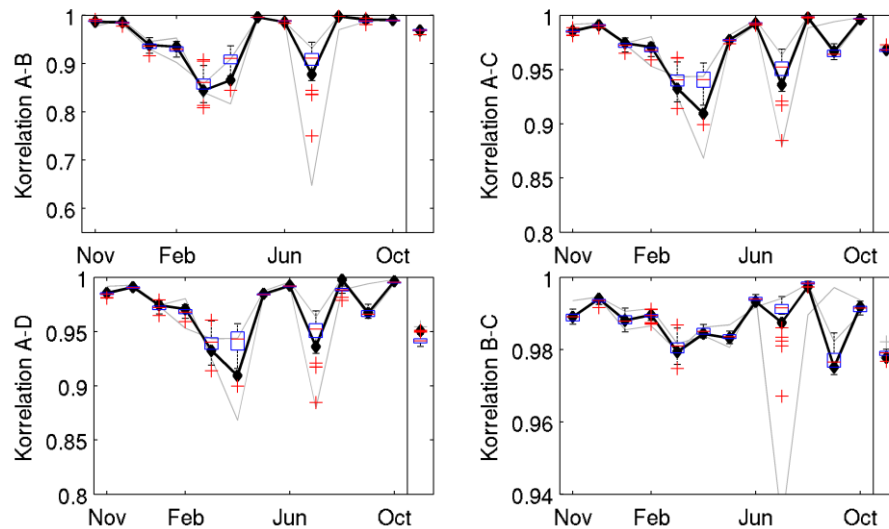


Abbildung A92: Vergleich ausgesuchter monatlicher und jährlicher Kreuzkorrelationen zwischen lokalen Zuflüssen des Zeitraums 2071-2100, B1 für das regionale Klimamodell CLM. Die Statistiken des Gesamtdatensatzes ist als schwarze Linie dargestellt, die Statistiken der einzelnen Realisationen in grau. Die Statistiken der simulierten Zuflüsse des hkn-sma Modells sind als Boxplots dargestellt.

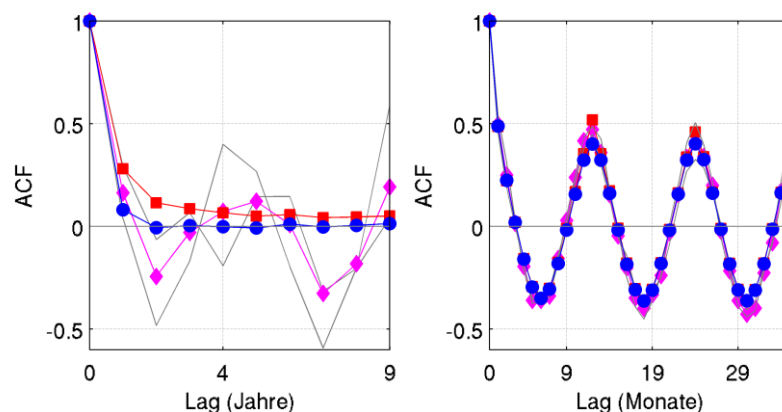


Abbildung A93: Autokorrelogramm auf jährlicher Zeitskala (links) und monatlicher Zeitskala (rechts) für den Zeitraum 2071-2100, CLM, A1B. In grau sind die Autokorrelogramme der zehn einzelnen Realisationen dargestellt, in schwarz die Bandbreite aus den Rekombinationen des Gesamtdatensatzes. Weiterhin sind dargestellt: hkn-sma Modell (rot), hkn Modell (blau) und verwendeter Gesamtdatensatz (magenta).

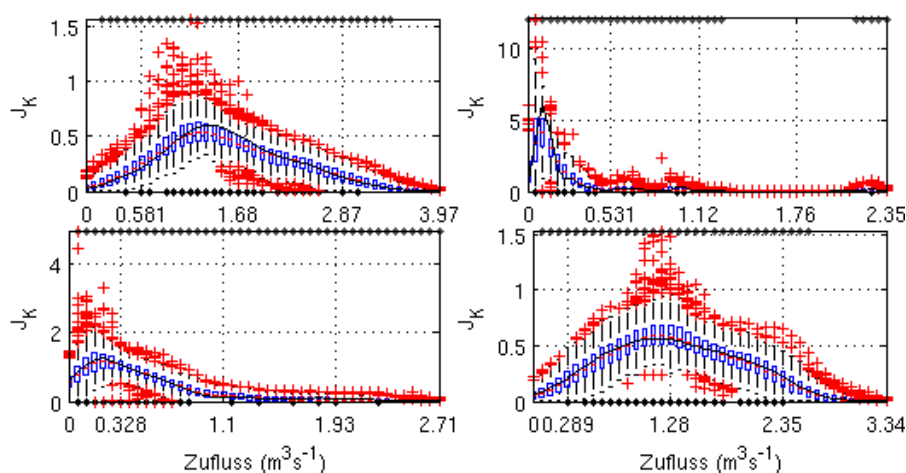


Abbildung A94: Marginale Dichtefunktionen  $J_K$  der Zuflüsse des Zeitraums 2071-2100, CLM, B1, in den Monaten Januar (oben links), April (oben rechts), Juni (unten links) und Oktober (unten rechts) für den lokalen Zufluss A.  $J_K$  der beobachteten Zuflüsse ist als schwarze Linie dargestellt. Boxplots zeigen die marginalen Dichtefunktionen der simulierten Zuflüsse.

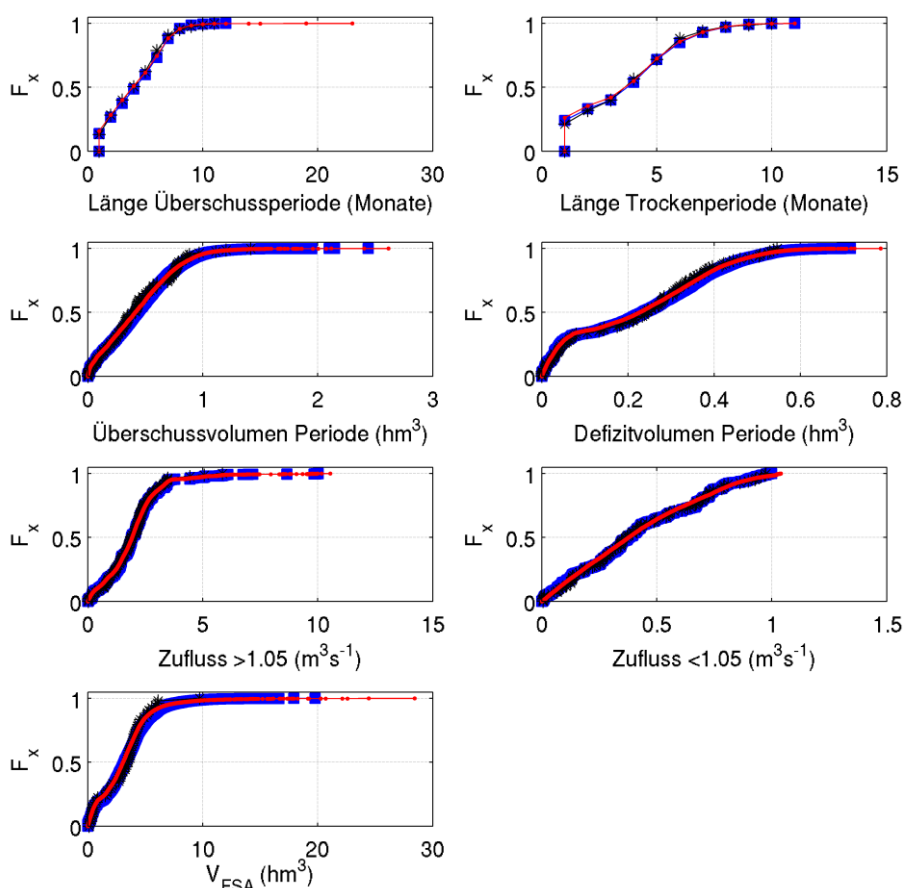


Abbildung A95: Empirische kumulative Verteilungsfunktionen  $F_x$  unterschiedlicher Parameter für Trockenperioden und Überschussperioden (Reanalysezeitraum 2071-2100, CLM, B1). Als Schwellenwert ist  $0,65 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  angesetzt, der Zufluss ist die Summe der lokalen Zuflüsse A und B. Schwarz dargestellt sind die beobachteten Zuflüsse, blau die Zuflüsse des hkn Modells und rot die Zuflüsse des hkn-sma Modells.

